

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh zařízení pro tvorbu náhradního
vysokopecního plynu na bázi zemní plyn + dusík
pro plynové hospodářství hutního závodu

A Proposal for a Substitute Stock Gas
Generation Unit Using Natural Gas + Nitrogen
Mixture in a Steel Works's Gas System

Student :

Bc. Zdeněk Smetana

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Míka, CSc

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Zdeněk Smetana**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2302T006 Energetické stroje a zařízení**
Téma: **Návrh zařízení pro tvorbu náhradního vysokopecního plynu na bázi zemní plyn + dusík pro plynové hospodářství hutního závodu**
A Proposal for a Substitute Stock Gas Generation Unit Using Natural Gas + Nitrogen Mixture in a Steel Works's Gas System

Zásady pro vypracování:

Stanovte fyzikální a spalovací vlastnosti náhradního vysokopecního plynu na bázi dusík + zemní plyn a porovnejte s vlastnostmi vysokopecního plynu. Porovnejte vlastnosti směsného plynu používaného v hutním závodě se směsným plynem s různým obsahem náhradního vysokopecního plynu na bázi zemní plyn + dusík. Proveďte teoreticky porovnání stability spalování těchto různých směsí směsného plynu při konstantní výhřevnosti (příp. konstantním Wobbeho čísla) na hořáku souproutého typu. Navrhněte zkušební zařízení pro zkoušky hořáků.

Diplomová práce bude obsahovat:

- 1) Příslušné výpočty a porovnání fyzikálních a spalovacích vlastností různých směsí směsného plynu.
- 2) Určení průběhu míšení a hodnocení stability u souproutého hořáku určitého výkonu.
- 3) Návrh zkušebního zařízení pro zkoušky hořáků.
- 4) Technologické schéma směsné stanice náhradního vysokopecního plynu pro maximální množství náhradního vysokopecního plynu.
- 5) Konstruktivní návrh směsné stanice náhradního vysokopecního plynu.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] Kysela L.: Plynárenské rozvody a spotřebiče.. Poznámky k přednáškám . Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava.
- [2] Kolektiv autorů: Plynárenská příručka. Vydała s.r.o. Gas Praha 1997.
- [3] Kysela L: Studie podmínek pro přechod plynových spotřebičů ve s.p. Vítkovice na náhradní plyn. Studie katedry energetiky .
- [4] Kysela L: Studie zaměnitelnosti topných plynů a model plynové bilance Nové Huti, a.s. Ostrava. Studie katedry energetiky VŠB – TU Ostrava, červen 1994.
- [5] Pelikán V: Optimalizace spalovacích vlastností směsného plynu. Autoreferát doktorské disertační práce. Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava, 2007.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Míka, CSc.**


Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011





prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

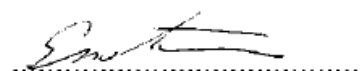


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2011



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20.5.2011



podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Zdeněk Smetana

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ostrava – Poruba

Opavská 789

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SMETANA, Z. *Návrh zařízení pro tvorbu náhradního vysokopecního plynu na bázi zemní plyn + dusík pro plynové hospodářství hutního závodu: diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2011, 55 s. Vedoucí práce: Míka, J.

Diplomová práce se zabývá problematikou topných plynů a jejich směsí v hutním průmyslu. Jsou zde představeny jednotlivé topné plyny používané v hutním průmyslu, jejich složení a fyzikální a spalovací vlastnosti. V práci jsou shrnuty výpočtové vztahy nutné k určení složení směsných plynů a k určení vlastností těchto plynů. Je zde odvozen vztah k určení poměru míšení výchozích plynů, tak aby vznikl směsný plyn s požadovaným Wobbeho číslem. Pak je nalezena náhrada vysokopecního plynu a zvolen způsob jeho míšení ve směsné stanici tak, aby tento plyn v případě potřeby zastoupil původní vysokopecní plyn. Pro výrobu tohoto náhradního vysokopecního plynu je navržena směsná stanice.

ANNOTATION OF THESIS

SMETANA, Z. *A Proposal for a Substitute Stock Gas Generation Unit Using Natural Gas + Nitrogen Mixture in a Steel Works Gas System: Master Thesis.* Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of power supply, 2011, 55 p. Thesis head: Míka, J.

The thesis deals with the topic of fuel gases and their mixtures in metallurgical industry. Individual fuel gases used in metallurgical industry are introduced here, their composition, and physical and combustion attributes. There are summarized equations which are necessary for determination of the structure of mixed gases and for determination of the attributes of these gases. The relation for determination of the ratio of mixing source gases is written here to create the mixed gas with required Wobbe's number. Then, a replacement for stock gas is found, and a way to its mixing at mixing station is chosen so that this gas can replace the source of stock gas if needed. A mixing station is proposed for production of this stock gas substitution.

OBSAH

| | |
|--|--------|
| Seznam tabulek | - 8 - |
| Seznam obrázků a grafů | - 8 - |
| Použité symboly | - 9 - |
| Použité indexy | - 10 - |
| 1 Úvod..... | - 11 - |
| 2 Specifikace produkovaných plynů a nakládání s nimi | - 12 - |
| 2.1 Vysokopeční plyn..... | - 12 - |
| 2.2 Koksárenský plyn..... | - 13 - |
| 2.3 Zemní plyn | - 13 - |
| 2.4 Hutní směsný plyn | - 13 - |
| 2.5 Chemické složení hutních plynů | - 14 - |
| 3 Výpočtové vztahy..... | - 14 - |
| 3.1 Objemový podíl, koncentrace | - 14 - |
| 3.2 Spalné teplo, výhřevnost..... | - 15 - |
| 3.3 Hustota, hutnota | - 15 - |
| 3.4 Wobbeho číslo, spalovací potenciál..... | - 16 - |
| 3.5 Výpočet směšovacího poměru při zadané výhřevnosti | - 17 - |
| 3.6 Výpočet směšovacího poměru při zadaném Wobbeho čísle | - 17 - |
| 3.7 Složení směsného plynu..... | - 19 - |
| 3.8 Rozmezí zápalnosti (výbušnosti) | - 20 - |
| 3.8.1 Výpočet dolní meze zápalnosti | - 20 - |
| 3.8.2 Výpočet horní meze zápalnosti..... | - 21 - |
| 3.9 Výpočet rychlosti šíření plamene..... | - 21 - |
| 3.10 Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci plynu | - 22 - |
| 3.11 Teplota plamene a složení spalín | - 24 - |
| 3.11.1 Výpočet entalpie a složení spalín..... | - 24 - |
| 3.11.2 Výpočet adiabatické teploty spalín..... | - 25 - |
| 3.11.3 Výpočet teoretické teploty spalín | - 26 - |
| 3.12 Výpočet obrysu plamene pro difusní turbulentní hořák..... | - 26 - |
| 3.12.1 Rychlostní profil | - 27 - |
| 3.12.2 Obrys plamene | - 28 - |
| 4 Rekapitulace výchozích údajů..... | - 28 - |
| 4.1 Fyzikální a spalovací vlastnosti hutních plynů | - 29 - |

| | | |
|-------|---|--------|
| 5 | Náhradní vysokopecní plyn..... | - 30 - |
| 5.1 | Směšovací poměr náhradního vysokopecního plynu..... | - 30 - |
| 5.2 | Chemické složení náhradního vysokopecního plynu | - 31 - |
| 5.3 | Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu | - 31 - |
| 5.4 | Záměnnost náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu..... | - 33 - |
| 6 | Hutní směsný plyn a náhradní směsný plyn..... | - 34 - |
| 6.1 | Výpočet směšovacího poměru směsných plynů | - 34 - |
| 6.2 | Stanovení chemického složení směsných plynů..... | - 36 - |
| 6.3 | Fyzikální a spalovací vlastnosti směsných plynů | - 37 - |
| 6.4 | Záměnnost směsných plynů | - 41 - |
| 7 | Směsná stanice | - 44 - |
| 7.1 | Potřebné množství plynu | - 44 - |
| 7.2 | Dimenzování potrubí směsné stanice | - 45 - |
| 7.2.1 | Výpočet Reynoldsova čísla..... | - 46 - |
| 7.2.2 | Výpočet tlakové ztráty..... | - 47 - |
| 7.3 | Shrnutí hodnot | - 48 - |
| 7.4 | Výtokový otvor směšovacího kusu..... | - 49 - |
| 7.5 | Rozvod dusíku | - 49 - |
| 7.6 | Rozvod zemního plynu | - 50 - |
| 7.7 | Směšovací kus | - 50 - |
| 7.8 | Potrubí směsného plynu | - 53 - |
| 8 | Závěr..... | - 53 - |
| | Seznam použité literatury..... | - 54 - |
| | Seznam příloh | - 55 - |

Seznam tabulek

| | |
|---|--------|
| Tabulka č.1 Složení koksárenského, vysokopecního a zemního plynu..... | - 14 - |
| Tabulka č.2 Fyzikální vlastnosti hutních plynů | - 30 - |
| Tabulka č.3 Spalovací vlastnosti hutních plynů..... | - 30 - |
| Tabulka č.4 Složení dusíku, náhradního vysokopecního a zemního plynu | - 31 - |
| Tabulka č.5 Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu | - 32 - |
| Tabulka č.6 Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu | - 32 - |
| Tabulka č.7 Složení hutního směsného plynu..... | - 36 - |
| Tabulka č.8 Složení náhradního směsného plynu..... | - 37 - |
| Tabulka č.9 Fyzikální vlastnosti hutního směsného plynu..... | - 38 - |
| Tabulka č.10 Fyzikální vlastnosti náhradního směsného plynu..... | - 39 - |
| Tabulka č.11 Spalovací vlastnosti hutního směsného plynu | - 40 - |
| Tabulka č.12 Spalovací vlastnosti náhradního směsného plynu | - 40 - |
| Tabulka č.13 Souřadnice profilu plamene | - 43 - |
| Tabulka č.14 Rozměry a tlaková ztráta směsné stanice | - 48 - |

Seznam obrázků a grafů

| | |
|---|--------|
| Obrázek č.1 Parabola..... | - 23 - |
| Graf č.1 Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci plynu | - 34 - |
| Graf č.2 Závislost množství KP na ZP při Wobbeho čísle 8,2 MJ/m ³ | - 35 - |
| Graf č.3 Diagram zaměnitelnosti plynů..... | - 42 - |
| Graf č.4 Porovnání profilů plamene směsných plynů | - 44 - |
| Obrázek č.2 Vířivý směšovač..... | - 51 - |
| Obrázek č.2 Souproudý směšovač..... | - 52 - |

Použité symboly

| | | |
|----------------|-----------------------------------|---|
| C | [kJ/m ³] | spalovací potenciál |
| D | [m] | průměr |
| DN | [mm] | jmenovitý průměr |
| K | [%] | koncentrace |
| P | [W] | výkon |
| PN | [bar] | jmenovitý tlak |
| Q _l | [kJ/m ³] | výhřevnost |
| Q _s | [kJ/m ³] | spalné teplo[MJ/m ³] |
| Re | [1] | Reynoldsovo číslo |
| T | [°K] | termodynamická teplota |
| V | [m ³] | objem |
| \dot{V} | [m ³ /s] | objemový průtok |
| W | [kJ/m ³] | Wobeho číslo (index) |
| c _p | [J/K.m ³] | měrná tepelná kapacita za stálého tlaku |
| d | [1] | hutnota |
| i | [kJ/ m ³] | měrná entalpie |
| p | [kPa] | tlak |
| t | [°C] | termodynamická teplota |
| u | [m/s] | rychlost šíření plamene |
| v | [m/s] | rychlost proudění |
| ε | [Pa/s] | střední nerovnost |
| η | [Pa/s] | dynamická viskozita |
| λ | [1] | součinitel tření |
| ρ | [kg/m ³] | hustota |
| ω | [m ³ /m ³] | objemový podíl |

Použité indexy

| | |
|-----|---------------------------|
| č | čistá hořlavina |
| DMV | dolní mez výbušnosti |
| HMV | horní mez výbušnosti |
| HSP | hutní směsný plyn |
| NSP | náhradní směsný plyn |
| NVP | náhradní vysokopecní plyn |
| KP | koksárenský plyn |
| VP | vysokopecní plyn |
| PI | plyn |
| Sm | směs , směsný plyn obecně |
| Sp | spaliny |
| Sk | skutečný, skutečné |
| ZP | zemní plyn |
| ekv | ekvivalentní |
| n | normální |
| i | složka |
| t | teoretické |
| MAX | největší, maximální |
| VZ | vzduch |

1 Úvod

Využitím druhotných energetických zdrojů nahrazujeme mnohdy drahá primární paliva. To přináší jednak ekonomický efekt, ale také chráníme životní prostředí, tím že do ovzduší nevnášíme další znečištění, které by vzniklo spalováním těchto primárních paliv. Hutní průmysl produkuje značné množství plyných odpadů, které je možné využít jako druhotné zdroje. Vysoký energetický potenciál těchto zdrojů je dán teplem chemicky vázaným v plynech. Hutní závod (jako ArcelorMittal Ostrava), který má vlastní vysoké pece a vlastní výrobu koksu pro tyto pece, má možnost využívat pro ohřev materiálu na válcovacích tratích vysokopecní a koksárenský plyn nebo jejich směs tzv. hutní směsný plyn. Případně lze tyto plyny využít pro výrobu páry, která je dále určena k sociálním účelům, ale hlavně tuto páru dále transformujeme na potřebný druh energie a to především elektrické. Velkou výhodou užití těchto druhotných surovin je jejich spotřeba přímo na místě v technologickém procesu. Odpadá doprava a další ztráty při transformacích. A hlavně množství produkováných plynů je svázáno s potřebou těchto plynů pro ohřev. Pro vyšší výrobu na válcovacích tratích je nutné vyšší množství topných plynů, ale také je nutné zvýšit výrobu surového železa a koksu pro vysoké pece. Vyšší výroba železa a koksu se odrazí zvýšenou produkcí hutních plynů tak, že poptávka válcoven po těchto plynech je automaticky uspokojena. A naopak při snížení množství válcovaného materiálu se zároveň sníží výroba na koksově na vysokých pecích a klesne množství produkováných plynů. Drobné rozdíly v produkci a potřebě plynů mohou vzniknout například tím, že při zvyšování výroby musí nejdříve zvednout produkci koksovna, pak vysoké pece, následně ocelárna a teprve potom začnou válcovací tratě spotřebovávat vyšší množství plynu. Tento časově omezený nesoulad je regulován množstvím plynu spalovaného na teplárně a množstvím zemního plynu dodávaného do hutního směsného plynu. Při nedostatku plynů se omezí spalování vysokopecního plynu v parních kotlích, kde je plyn nahrazen vyšším podílem spalovaného uhlí, tak aby byly naplněny potřeby výroby páry. Ušetřený vysokopecní plyn navýší množství hutního směsného plynu, který je však třeba dotovat zvýšeným množstvím zemního plynu pro udržení stabilní výhřevnosti. A naopak nadbytky vysokopecního plynu jsou využity pro výrobu páry při snížení podílu uhlí na výrobě energie. Nadbytky koksárenského plynu jsou spalovány v kotlích teplárny. Nedostatek koksárenského plynu je

nahrazen vyšším podílem zemního plynu v hutním směsném plynu. Stabilní tlak v potrubí koksárenského plynu je udržován plynojemem. Ten je schopen v určitých mezích akumulovat nadbytky koksárenského plynu a v případě nižší výroby a vyšší spotřeby dotuje síť koksárenského plynu. Momentální tlakové špičky v rozvodech vysokopecního plynu řeší zařízení pro spalování přebytků vysokopecního plynu, kde je plyn spalován volně do atmosféry. Problém může nastat při jednopecním provozu. V případě výpadku jedné běžící pece klesne přetlak v potrubí a mohlo by dojít k nasátí vzduchu a vytvoření výbušné atmosféry v rozvodech plynu. Proto je nutné k hlavnímu řadu vysokopecního plynu připojit směsnou stanici, která by v případě potřeby vyráběla náhradu vysokopecního plynu. Tato stanice musí být schopna dodávat náhradní plyn do potrubí vysokopecního plynu a tím udržet přetlak v potrubí a udržet v chodu nejdůležitější agregáty spalující hutní směsný plyn.

2 Specifikace produkováných plynů a nakládání s nimi

2.1 Vysokopecní plyn

je odpad při výrobě surového železa. Ve vysoké peci se kyslík z železné rudy váže na uhlík obsažený v koksu. Teplo potřebné k této reakci vzniká spalováním koksu s podstechiometrickým množstvím vzduchu. Proto vysokopecní plyn obsahuje až 60% dusíku, 20 – 30% oxidu uhelnatého, přes 10% oxidu uhličitého a okolo 2% vodíku. Protože jedinou hořlavinou v tomto plynu je zanedbatelné množství vodíku a oxid uhelnatý, který sám o sobě má nízké spalné teplo, tento topný plyn má relativně nízkou výhřevnost a proto sám špatně hoří. Z tohoto důvodu se spaluje ve směsích s jinými plyny, nejčastěji jako složka hutního směsného plynu. Dále se spaluje při předehevu vzduchu pro vysoké pece, v poměru 20 dílů vysokopecního plynu ku 1 dílu koksárenského plynu. Spaluje se také na koksovně, kde se baterie vytápějí čistým koksárenským plynem, nebo směsí vysokopecního a koksárenského plynu v poměru 37 dílů vysokopecního plynu ku 1 dílu koksárenského plynu. Samostatně se spaluje jen v parních kotlích. Ale při samostatném spalování, nebo při spalování současně s práškovým uhlím je nutná stabilizace plamene. Obsah oxidu uhelnatého je příčinou velmi vysoké toxicity, plynu.

2.2 Koksárenský plyn

je druhotným produktem při výrobě koksu suchou destilací uhlí. To je proces při, kterém je uhlí zahříváno v bateriích bez přístupu vzduchu. Prchavé látky se uvolní a vzniklý koks je téměř čistý uhlík. Sekundárním produktem je koksárenský plyn. Z této technologie vyplývá složení koksárenského plynu a následně jeho vlastnosti. Plyn obsahuje až 60 % vodíku a z toho vyplývají široké meze výbušnosti a nízká hustota plynu. Další hořlavinou je 20 – 30% metanu, asi 6% oxidu uhelnatého a asi 2% vyšších uhlovodíků. Vysokým obsahem těchto hořavin je dána poměrně vysoká výhřevnost. Obsah oxidu uhelnatého je příčinou toxicity, plynu. Zbylý obsah doplňuje dusík a oxid uhličitý. Pro svoji vysokou výhřevnost je koksárenský plyn samostatně spalován jen tam, kde je nutné docílit vysokých teplot. To je například v některých místech na ocelárně a slévárně. V případě nedostatku vysokopecního plynu se samostatným koksárenským plynem otápějí koksárenské baterie. Jinak se spaluje ve směsích s jinými plyny. Při míšení koksárenského plynu s plynem vysokopecním získáme velké množství plynu, který má dostatečnou výhřevnost pro použití na většině agregátů v hutním závodě.

2.3 Zemní plyn

řadíme mezi primární energetické zdroje. Jako fosilní palivo vznikl rozkladem zbytků pravěkých rostlin a živočichů. Obsahuje přes 95% metanu zbytek doplňuje oxid uhličitý a dusík. Z vysokým obsahem metanu souvisí vysoká výhřevnost. Pokud je zemní plyn využíván v hutním závodě musíme jej nakupovat od distributorů. Proto je samostatně spalován jen výjimečně, a to k sociálním účelům nebo tam, kde je nutné docílit vysokých teplot. Ve směsných plynech nahrazuje svojí vysokou výhřevností koksárenský plyn v případě jeho nedostatku.

2.4 Hutní směsný plyn

vzniká míšením vysokopecního, koksárenského a zemního plynu tak, aby výhřevnost vyhovovala potřebám válcovacích tratí. Míšení probíhá na dvou směsných stanicích ve dvou možných režimech. V obou režimech je změnou polohy regulační klapky vysokopecního plynu udržován konstantní tlak směsného plynu. Množství vysokopecního plynu je tedy závislé na odebíraném množství hutního směsného plynu. V režimu AUTOMAT je množství zemního plynu regulováno tak, aby bylo dodrženo sjednané množství hutního směsného plynu. V režimu POLOAUTOMAT je množství zemního plynu nastaveno pevně

operátorem. Koksárenský plyn je v obou režimech doplňován tak, aby bylo dodrženo konstantní Wobbeho číslo $8,2 \pm 0,3 \text{ MJ/m}^3$.

2.5 Chemické složení hutních plynů

Vzhledem k tomu, že hutní plyny jsou odpadní produkty hutních technologií, jejich složení se mění v závislosti na stavu výroby primárních hutních produktů. Průměrné složení koksárenského, vysokopecního a zemního plynu jsem čerpal z bezpečnostních listů. Pro srovnání je chemické složení uvedeno přehledně vedle sebe v Tabulka č.1. Z těchto údajů jsou vypočteny fyzikální a spalovací vlastnosti, které jsou uvedeny v Tabulka č.2 a v Tabulka č.3.

| látká | jednotka | zemní plyn | koksárenský plyn | vysokopecní plyn |
|-------------------------------|-----------------------------------|------------|------------------|------------------|
| H ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,5500 | 0,0500 |
| CH ₄ | [m ³ /m ³] | 0,9769 | 0,2350 | 0,0000 |
| C _n H _m | [m ³ /m ³] | 0,0121 | 0,0350 | 0,0000 |
| CO | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,0560 | 0,2500 |
| CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0021 | 0,0200 | 0,2200 |
| N ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0089 | 0,0960 | 0,4800 |
| O ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,0080 | 0,0000 |
| kontrolní součet | [m ³ /m ³] | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |

Tabulka č.1 Složení koksárenského, vysokopecního a zemního plynu

3 Výpočtové vztahy

Pokud není uvedeno jinak, všechny vlastnosti a výpočty se vztahují, tak jak je zvykem, na suchý plyn, za normálních podmínek, to je při termodynamické teplotě 273,15 K (t = 0°C) a tlaku 101,325 kPa. Procenta jsou objemová.

3.1 Objemový podíl, koncentrace

Složení plynů se často udává koncentracemi K [%], pro výpočty je výhodnější používat objemové podíly $\omega [\text{m}^3/\text{m}^3]$ (někdy také nazývaný objemový zlomek). Vztah mezi objemovým podílem a koncentrací.

$$\omega_i = K_i / 100 \quad (1)$$

Objemové podíly jednotlivých složek vypočteme jako

$$\omega_i = \frac{V_i}{V_{Sm}} \quad [m^3/m^3] \quad (2)$$

Když je objem směsi V_{Sm} roven 1 pak $\omega_i = V_i$. Z toho vyplývá že 1 m^3 směsi obsahuje právě $\omega_i m^3$ složky i .

Potom součet objemových podílů jednotlivých plynů ve směsném plynu musí být roven jedné.

$$\sum \omega_i = \sum \frac{V_i}{V_{Sm}} = \frac{\sum V_i}{V_{Sm}} = 1 \quad (3)$$

3.2 Spalné teplo, výhřevnost

Spalné teplo je takové množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství paliva stechiometrickým množstvím kyslíku nebo vzduchu za konstantního tlaku a teploty, přičemž všechny produkty spalování ochlazené na původní teplotu jsou v plynném stavu kromě vody. Jako výchozí teplota se uvažuje 25 °C [2, s. 91]. Předpokládá se, že voda, vzniklá spalováním, zkondenzuje a energií chemické reakce není třeba redukovat skupenské teplo vody. Tím se spalné teplo liší od výhřevnosti, kde se předpokládá na konci reakce voda v plynném skupenství. Proto je hodnota spalného tepla vždy větší nebo alespoň rovna hodnotě výhřevnosti.

Spalné teplo plynů je tedy množství energie, které se uvolní spálením jednoho m^3 plynu. U směsi plynů můžeme tedy spalné teplo spočítat jako součet energií uvolněných při spálení jednotlivých složek, přičemž známe spalné teplo jednotlivých složek a množství jednotlivých složek je objem který zaujímají v jednom m^3 směsi, což je (2) objemový podíl.

$$Q_{S Sm} = \sum Q_{Si} \cdot \omega_i \quad [kJ/m^3] \quad (4)$$

Obdobně počítáme výhřevnost

$$Q_{I Sm} = \sum Q_{Ii} \cdot \omega_i \quad [kJ/m^3] \quad (5)$$

3.3 Hustota, hutnota

Hustota je hmotnost 1 m^3 plynu. Objem složky i v jednom metru krychlovém směsi je podle (2) roven $\omega_i m^3$. Hmotnost složky v jednom metru krychlovém směsi je tedy součin objemového podílu a hustoty dané složky. Když sečteme hmotnosti jednotlivých složek v jednom metru krychlovém směsi, získáme celkovou

hmotnost metru krychlového směsi. Hustota směsi je tedy součet součinu hustoty a objemového podílu jednotlivých složek.

$$\rho_{Sm} = \sum \rho_i \cdot \omega_i \quad [\text{kg/m}^3] \quad (6)$$

Hutnota je to relativní veličina ve vztahu ke vzduchu za normálních podmínek a vyjadřuje, zda je plyn lehčí nebo těžší než vzduch [1, s. 7].

$$d = \frac{\rho_{(n)}}{\rho_{vzd(n)}} \quad [-] \quad (7)$$

Pro směsný plyn pak do rovnice dosadíme (6)

$$d_{Sm} = \frac{\sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i}{\rho_{vzd(n)}} \quad [-] \quad (8)$$

3.4 Wobbeho číslo, spalovací potenciál

Pro vyjádření schopnosti zachování stálého tepelného příkonu se používá Wobbeho číslo. Vyšší Wobbeho číslo je poměr spalného tepla Q_s k hutnotě plynu.

$$W_s = \frac{Q_s}{\sqrt{d}} \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (9)$$

Pro směsný plyn pak do rovnice dosadíme (4) a (8)

$$W_{sSm} = \frac{\sum Q_{s_i} \cdot \omega_i}{\sqrt{\frac{\sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i}{\rho_{vz(n)}}}} \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (10)$$

Pro hodnocení záměnnosti topných plynů se podle ČSN 38 5543 [5] používá tzv. Delbourgova metoda, kde se tzv. korigované Wobbeho číslo, vypočte z vyššího Wobbeho čísla pomocí rovnice. [1, s. 7]

$$W' = W_s \cdot K_1 \cdot K_2 = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{Q_s}{\sqrt{d}} \quad [\text{kJ.m-3}] \quad (11)$$

Korekční faktory K_1, K_2 jsou různé, závisí na tom, jedná-li se o plyn s vyšším podílem vodíku (plyny typu svítiplyn) nebo s větším podílem uhlovodíků (plyny typu zemní plyn).

Jejich hodnoty jsou v normě uvedeny jednak ve formě grafů, jednak ve tvaru regresních funkcí (pro výpočty na PC).

Spalovací potenciál je kriteriem ve vztahu k rychlosti šíření plamene. Podle ČSN 38 5543 se určí pomocí rovnice

$$C = u \cdot \frac{(\omega_{H_2} + 0,3 \cdot \omega_{CH_4} + 0,7 \cdot \omega_{CO} + v \cdot \sum a_i \cdot \omega_{C_iH_j}) \cdot 100}{\sqrt{d}} \quad (12)$$

Zde jsou hodnoty u , v koeficienty, které charakterizují druh plynu, a_i jsou korekční koeficienty pro vyšší uhlovodíky C_nH_m . (hodnoty jsou v tabulce 3 normy). Pro nenasycené uhlovodíky z karbonizace uhlí (koksovy) a tlakového zplyňování je možno brát $a_i = 1,1$.

3.5 Výpočet směšovacího poměru při zadané výhřevnosti

V případech, kdy původní topný plyn nahrazujeme směsným plynem a požadujeme, aby zůstaly zachovány parametry hořáku, jde v podstatě o to, aby bylo hořákem při původním objemovém průtoku dodáno původní množství tepelné energie. To bude splněno v případě, že plyn bude mít stejnou výhřevnost (5). Při stanovení objemových podílů jednotlivých složek směsného plynu tak, abychom dostali směs s požadovanou výhřevností, řešíme soustavu rovnic (3) a (5).

S tím, že objemové podíly dvou složek považujeme za neznámé a zbylé veličiny jsou konstantami. Z rovnice (3) vyjádříme ω_3

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \Rightarrow \omega_3 = 1 - \omega_1 - \omega_2 \quad (13)$$

a dosadíme do (5)

$$\begin{aligned} \omega_1 \cdot Q_{i1} + \omega_2 \cdot Q_{i2} + \omega_3 \cdot Q_{i3} &= 1 \cdot Q_{iSm} \\ \omega_1 \cdot Q_{i1} + \omega_2 \cdot Q_{i2} + (1 - \omega_1 - \omega_2) \cdot Q_{i3} &= Q_{iSm} \end{aligned} \quad (14)$$

po úpravách

$$\begin{aligned} \omega_1 \cdot Q_{i1} + \omega_2 \cdot Q_{i2} + Q_{i3} \cdot 1 - Q_{i3} \cdot \omega_1 - Q_{i3} \cdot \omega_2 &= Q_{iSm} \\ \omega_1 \cdot (Q_{i1} - Q_{i3}) + \omega_2 \cdot (Q_{i2} - Q_{i3}) + Q_{i3} &= Q_{iSm} \\ \omega_2 &= \frac{1 \cdot Q_{iSm} - \omega_1 \cdot (Q_{i1} - Q_{i3}) - Q_{i3}}{(Q_{i2} - Q_{i3})} \end{aligned} \quad (15)$$

Když si zvolíme podíl jedné složky, podíl druhé složky vypočítáme podle (15) a třetí složku dopočítáme podle (3).

3.6 Výpočet směšovacího poměru při zadaném Wobeho číslu

Na rozdíl od minulé kapitoly, kdy jsme od směsného plynu požadovali stabilní výkon, mohou nastat případy, kdy požadujeme udržení stability spalování. To docílíme mimo jiné u plynů se stejným Wobeho číslem. Při výpočtu poměrů míšení jednotlivých složek tak, aby výsledná směs dosahovala požadované Wobeho číslo, řešíme soustavu rovnic (3) a (10). S tím, že objemové podíly dvou složek považujeme za neznámé a zbylé veličiny jsou konstantami.

Nejprve upravíme rovnici (10)

$$W_{S Sm} = \frac{\sum Q_{Si} \cdot \omega_i}{\sqrt{\frac{\sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i}{\rho_{vzd(n)}}}} \Rightarrow \frac{W_{S Sm} \cdot \sqrt{\sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i}}{\sqrt{\rho_{vzd(n)}}} = \sum Q_{Si} \cdot \omega_i \Rightarrow$$

$$\frac{(W_{S Sm})^2 \cdot \sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i}{\rho_{vzd(n)}} = (\sum Q_{Si} \cdot \omega_i)^2 \Rightarrow 0 = (\sum Q_{Si} \cdot \omega_i)^2 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \sum \rho_{i(n)} \cdot \omega_i$$
(16)

Dosadíme jednotlivé složky směsného plynu.

$$0 = (Q_{S1} \cdot \omega_1 + Q_{S2} \cdot \omega_2 + Q_{S3} \cdot \omega_3)^2 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot (\rho_1 \cdot \omega_1 + \rho_2 \cdot \omega_2 + \rho_3 \cdot \omega_3)$$

a upravíme

$$0 = Q_{S1}^2 \cdot \omega_1^2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S3} \cdot \omega_3 +$$

$$+ Q_{S2}^2 \cdot \omega_2^2 + 2 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 \cdot Q_{S3} \cdot \omega_3 + Q_{S3}^2 \cdot \omega_3^2 -$$

$$- \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_1 \cdot \omega_1 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \cdot \omega_3$$
(17)

Z rovnice (3) vyjádříme ω_3

$$\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1 \Rightarrow \omega_3 = 1 - \omega_1 - \omega_2$$
(18)

a dosadíme do rovnice (17)

$$0 = Q_{S1}^2 \cdot \omega_1^2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S3} \cdot (1 - \omega_1 - \omega_2) +$$

$$+ Q_{S2}^2 \cdot \omega_2^2 + 2 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 \cdot Q_{S3} \cdot (1 - \omega_1 - \omega_2) + Q_{S3}^2 \cdot (1 - \omega_1 - \omega_2)^2 -$$

$$- \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_1 \cdot \omega_1 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \cdot (1 - \omega_1 - \omega_2)$$

roznásobíme

$$0 = Q_{S1}^2 \cdot \omega_1^2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 + 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S3} -$$

$$- 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1^2 \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S1} \cdot \omega_1 \cdot Q_{S3} \cdot \omega_2 + Q_{S2}^2 \cdot \omega_2^2 +$$

$$+ 2 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2 \cdot Q_{S3} \cdot \omega_1 - 2 \cdot Q_{S2} \cdot \omega_2^2 \cdot Q_{S3} +$$

$$+ Q_{S3}^2 - 2 \cdot Q_{S3}^2 \cdot \omega_1 - 2 \cdot Q_{S3}^2 \cdot \omega_2 + Q_{S3}^2 \omega_1^2 + 2 \cdot Q_{S3}^2 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 + Q_{S3}^2 \omega_2^2 -$$

$$- \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_1 \cdot \omega_1 - \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_2 \cdot \omega_2 -$$

$$- \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 + \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \cdot \omega_1 + \frac{(W_{S Sm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \cdot \omega_2$$

vytkneme neznámé ω_1 a ω_2

$$\begin{aligned}
0 = & \omega_2^2 \cdot (Q_{S2}^2 - 2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} + Q_{S3}^2) \\
& + \omega_2 \cdot \omega_1 \cdot (2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S2} - 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} + 2 \cdot Q_{S3}^2) \\
& + \omega_2 \cdot \left(2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_2 + \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \right) \\
& + \omega_1^2 \cdot (Q_{S1}^2 - 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} + Q_{S3}^2) \\
& + \omega_1 \cdot \left(2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_1 + \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \right) \\
& + Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3
\end{aligned}$$

Pro zjednodušení nahradíme konstanty tak, aby nám z původní rovnice zůstaly jen neznámé ω_1 a ω_2 .

Rovnici můžeme psát ve tvaru,

$$0 = \omega_2^2 \cdot A + \omega_2 \cdot (B_1 \cdot \omega_1 + B_2) + \omega_1^2 \cdot C_1 + \omega_1 \cdot C_2 + C_3 \quad (19)$$

kde konstanty A, B₁, B₂, C₁, C₂, C₃ jsou,

$$\begin{aligned}
A &= Q_{S2}^2 - 2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} + Q_{S3}^2 \\
B_1 &= 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S2} - 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} + 2 \cdot Q_{S3}^2 \\
B_2 &= 2 \cdot Q_{S2} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_2 + \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \\
C_1 &= Q_{S1}^2 - 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} + Q_{S3}^2 \\
C_2 &= 2 \cdot Q_{S1} \cdot Q_{S3} - 2 \cdot Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_1 + \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3 \\
C_3 &= Q_{S3}^2 - \frac{(W_{SSm})^2}{\rho_{vzd(n)}} \cdot \rho_3
\end{aligned} \quad (20)$$

Pokud (19) řešíme jako kvadratickou rovnici z neznámou ω_2 dostaneme

$$\omega_2 = \frac{-(B_1 \cdot \omega_1 + B_2) \pm \sqrt{(B_1 \cdot \omega_1 + B_2)^2 - 4 \cdot A \cdot (\omega_1^2 \cdot C_1 + \omega_1 \cdot C_2 + C_3)}}{2 \cdot A} \quad (21)$$

Toto je rovnice závislosti objemového podílu druhé složky na složce číslo 1 pro zadané Wobeho číslo a pro známé výhřevnosti a hustoty tří složek směsného plynu. Jestli že do rovnice dosadíme zvolený objemový podíl složky číslo jedna, můžeme spočítat podíl druhé složky a podíl třetí složky dopočteme tak, aby součet objemových podílů byl roven 1 viz (3)

3.7 Složení směsného plynu

Pro výpočty fyzikálních a spalovacích vlastností směsného plynu je nutné znát jeho chemické složení.

V následujícím výkladu jsou prvek nebo sloučenina zahrnuty pod jednotný název látka a pojmem složka směsi je označován některý z hutních plynů, zemní plyn nebo dusík.

Objemový podíl jednotlivých prvků a sloučenin (látka) ve směsném plynu se vypočte jako součet součinů objemových podílů látek v příslušných složkách a objemových podílů složek ve směsi. Jako příklad je uveden výpočet objemového podílu oxidu uhelnatého obecně ve směsi která obsahuje podíly ω_i složek. Přičemž i-tá složka obsahuje podíl $\omega_{CO\ i}$ oxidu uhelnatého.

$$\omega_{CO\ Sm} = \sum \omega_{CO\ i} \cdot \omega_i \quad (22)$$

Například podíl oxidu uhelnatého v hutním směsném plynu je součin objemového podílu oxidu uhelnatého v koksárenském plynu a podílu koksárenského plynu v hutním směsném plynu, plus součin objemového podílu oxidu uhelnatého ve vysokopecním plynu a podílu vysokopecního plynu v hutním směsném plynu, plus součin objemového podílu oxidu uhelnatého v zemním plynu a podílu zemního plynu v hutním směsném. Matematicky vyjádřeno.

$$\omega_{CO\ HSP} = (\omega_{CO\ KP} \cdot \omega_{KP} + \omega_{CO\ VP} \cdot \omega_{VP} + \omega_{CO\ ZP} \cdot \omega_{ZP}) \quad (23)$$

3.8 Rozmezí zápalnosti (výbušnosti)

Aby došlo ke vznícení plynu, musí být malá část směsi zahřátá nad zápalnou teplotu a směs musí mít vhodnou koncentraci plynu ve vzduchu. Existuje proto tzv. dolní (spodní) mez zápalnosti (také pod zkratkou DMV). Je to nejnižší koncentrace, kdy směs paliva a vzduchu bude hořet. Budeme označovat K_{DMV} . A horní mez zápalnosti (také pod zkratkou HMV) jako nejvyšší koncentrace při které bude směs hořet. Budeme označovat K_{HMV} . Rozmezí těchto poměrů stanovujeme také z bezpečnostních důvodů. Například při opravách potrubí, kdy je používán otevřený oheň nebo může dojít k zajiskření je nutné, aby koncentrace plynů byla nižší než dolní (spodní) mez zápalnosti. Norma udává konkrétně jednu desetinu dolní meze. V případě že koncentrace plynů v uzavřeném prostoru je nad dolní hranici a v tomto prostoru dojde k iniciaci, nastane explozivní hoření, výbuch.

3.8.1 Výpočet dolní meze zápalnosti

Nejdříve určíme objemové podíly jednotlivých hořlavých složek v čisté hořlavině. Například pro CO

$$\omega_{CO-\xi} = \frac{\omega_{CO}}{\omega_{CO} + \omega_{H_2} + \omega_{CH_4} + \omega_{C_nH_m}} \quad [1, s.10] \quad (24)$$

- 20 -

Určíme spodní mez zápalnosti z čistých hořlavých složek podle rovnice

$$K_{DMV-\checkmark} = \frac{1}{\frac{\omega_{CO-\checkmark}}{K_{d-CO}} + \frac{\omega_{H_2-\checkmark}}{K_{d-H_2}} + \frac{\omega_{CH_4-\checkmark}}{K_{d-CH_4}} + \frac{\omega_{C_nH_m-\checkmark}}{K_{d-C_nH_m}}} \quad [1, s.10] \quad (25)$$

Vypočteme procentuální podíl nehořlavých složek ve směsi (koncentrace balastu)

$$B = (\omega_{CO_2} + \omega_{N_2} + \omega_{H_2O}) \cdot 100 \quad (26)$$

Dolní mez zápalnosti korigovaná na balast bude: [1, s.10]

$$K_{DMV} = \frac{(1 + \frac{B}{100 - B}) \cdot 100}{100 + K_{d-\checkmark} \cdot \frac{B}{100 - B}} \cdot K_{d-\checkmark} \quad [1, s.10] \quad (27)$$

3.8.2 Výpočet horní meze zápalnosti

Nejdříve určíme objemové podíly jednotlivých hořlavých složek v čisté hořlavině podle (24). Určí se horní mez zápalnosti z čistých hořlavých složek podle rovnice

$$K_{HMV-\checkmark} = \frac{1}{\frac{\omega_{CO-\checkmark}}{K_{h-CO}} + \frac{\omega_{H_2-\checkmark}}{K_{h-H_2}} + \frac{\omega_{CH_4-\checkmark}}{K_{h-CH_4}} + \frac{\omega_{C_nH_m-\checkmark}}{K_{h-C_nH_m}}} \quad [1, s. 7] \quad (28)$$

Vypočteme procentuální podíl nehořlavých složek ve směsi podle (26). Horní mez zápalnosti korigovaná na balast bude:

$$K_{HMV} = \frac{(1 + \frac{B}{100 - B}) \cdot 100}{100 + K_{h-\checkmark} \cdot \frac{B}{100 - B}} \cdot K_{h-\checkmark} \quad [1, s. 7] \quad (29)$$

3.9 Výpočet rychlosti šíření plamene.

Nejdříve určíme koncentraci směsi plynu a vzduchu, při níž je maximální rychlost šíření plamene pro směs tvořenou pouze hořlavými složkami, tj. pro čistou směs:

$$K_{u \max-\checkmark} = \frac{1}{\frac{\omega_{CO-\checkmark}}{K_{CO-\max}} + \frac{\omega_{H_2-\checkmark}}{K_{H_2-\max}} + \frac{\omega_{CH_4-\checkmark}}{K_{CH_4-\max}} + \frac{\omega_{C_nH_m-\checkmark}}{K_{C_nH_m-\max}}} \quad [1, s. 13] \quad (30)$$

Provedeme přepočítání této koncentrace na balast, obdobně jako u horní a dolní meze zápalnosti [1, s. 13]

$$K_{u \max} = \frac{(1 + \frac{B}{100 - B}) \cdot 100}{100 + K_{u \max - \check{c}} \cdot \frac{B}{100 - B}} \cdot K_{u \max - \check{c}} \quad [1, \text{s. } 13] \quad (31)$$

Vypočítáme rychlost šíření plamene při spalování čisté směsi při koncentraci $K_{u \max - \check{c}}$ podle rovnice [1, s. 13]

$$u_{n-\check{c}-\max} = \left(\frac{\omega_{\text{CO}-\check{c}} \cdot u_{n-\text{CO}-\max}}{K_{\text{CO}-\max}} + \frac{\omega_{\text{H}_2-\check{c}} \cdot u_{n-\text{H}_2-\max}}{K_{\text{H}_2-\max}} + \frac{\omega_{\text{CH}_4-\check{c}} \cdot u_{n-\text{CH}_4-\max}}{K_{\text{CH}_4-\max}} + \frac{\omega_{\text{C}_n\text{H}_m-\check{c}} \cdot u_{n-\text{C}_n\text{H}_m-\max}}{K_{\text{C}_n.\text{H}_m}} \right) \cdot K_{u \max - \check{c}} \quad (32)$$

Provede se korekce rychlosti na balast [1, s. 13]

$$u_{n-\max} = k_B \cdot u_{n-\check{c}-\max} \quad (33)$$

kde korekční součinitel [1, s. 13]

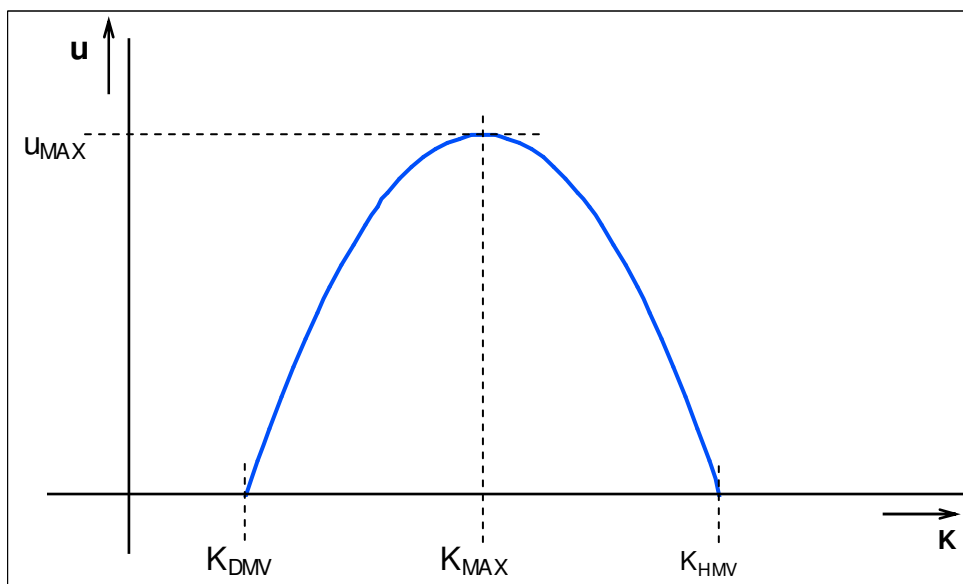
$$k_B = 1 - \omega_{\text{N}_2} - 1,2\omega_{\text{CO}_2} \quad (34)$$

Potom [1, s. 13]

$$u_{n-\max} = (1 - \omega_{\text{N}_2} - 1,2\omega_{\text{CO}_2}) \cdot u_{n-\check{c}-\max} \quad (35)$$

3.10 Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci plynu

Další důležitou spalovací vlastností, díky které můžeme posuzovat stabilitu hoření, je rychlost šíření plamene. Rychlost šíření plamene pro konkrétní plyn je funkcí koncentrace plynu ve vzduchu. Graf této závislosti se svým tvarem blíží parabole. Pokud závislost rychlosti hoření na koncentraci plynu ve vzduchu zjednodušíme na kvadratickou funkci, grafem této funkce bude parabola viz obrázek č. 1. Při grafickém znázornění křivku závislosti nahradíme tedy parabolou a rovnici této paraboly můžeme využít k orientačním výpočtům rychlosti hoření.



Obrázek č.1 Parabola

Obecná rovnice paraboly s vrcholem $V=[n;m]$ je

$$(x - n)^2 = -2 \cdot p \cdot (y - m) \quad (36)$$

V našem případě známe souřadnice vrcholu $V=[K_{MAX}; u_{MAX}]$ a známe souřadnice bodů, kde křivka protíná (respektive končí) vodorovnou osu.

Pro levou část paraboly, tedy pro interval $x \in \{K_{DMV}; K_{MAX}\}$ $X = [K_{DMV}; 0]$

Pro pravou část paraboly, tedy pro interval $x \in \{K_{MAX}; K_{HMV}\}$ $X = [K_{HMV}; 0]$

Když do obecné rovnice (36) dosadíme souřadnice vrcholu a jednoho bodu můžeme vypočítat parametr hledané paraboly.

$$(K_{DMV} - K_{MAX})^2 = -2 \cdot p \cdot (0 - u_{MAX}) \Rightarrow -2 \cdot p = -\frac{(K_{DMV} - K_{MAX})^2}{u_{MAX}} \quad (37)$$

Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci najdeme tak, že do obecné rovnice paraboly dosadíme známý parametr souřadnice vrcholu

$$(K - K_{MAX})^2 = -\frac{(K_{DMV} - K_{MAX})^2}{u_{MAX}} \cdot (u - u_{MAX})$$

po úpravách

$$u = \frac{(-u_{MAX}) \cdot (K - K_{MAX})^2}{(K_{DMV} - K_{MAX})^2} + u_{MAX} \quad \text{pro } K \in \{K_{DMV}; K_{MAX}\}$$

$$u = \frac{(-u_{MAX}) \cdot (K - K_{MAX})^2}{(K_{HMV} - K_{MAX})^2} + u_{MAX} \quad \text{pro } K \in \{K_{MAX}; K_{HMV}\} \quad (38)$$

Díky těmto rovnicím můžeme na základě znalosti maximální rychlosti šíření plamene, znalosti koncentrace potřebné pro tuto rychlost a znalosti koncentrací

při dolní i horní mezi výbušnosti stanovit přibližnou rychlost šíření při libovolné koncentraci.

3.11 Teplota plamene a složení spalin

Teplota plamene je v podstatě limitní teplota ke které se může více nebo méně přiblížit materiál ohříváný v technologickém procesu. Na této teplotě také závisí, do jaké míry může degradovat materiál vystavený tomuto plameni. Teplota plamene pak ovlivňuje výběr materiálu pro stavbu spalovacích komor, hořáků a dalších zařízení spalujících plyny nebo zařízení, která mohou přijít do styku s plamenem v případě poruchy a havárie.

3.11.1 Výpočet entalpie a složení spalin

Entalpie (tepelný obsah) je veličina vyjadřující tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. V našem případě je dodanou energií výhřevnost Q_i jednoho metru krychlového paliva a množstvím látky jsou spaliny vzniklé shořením jednoho metru krychlového paliva a daného množství vzduchu.

$$i_{s,sk} = \frac{Q_i}{V_{s,sk}} \quad [\text{kJ/m}^3] \quad (39)$$

Nejdříve je nutné stanovit složení a množství spalin. To provedeme pomocí stechiometrických rovnic na základě znalosti složení spalovaného plynu a přebytku vzduchu.

Teoretické množství kyslíku, to je množství kyslíku nutné pro dokonalé spálení jednoho metru krychlového paliva, vypočteme dle vztahu.

$$V_{O_{2,t}} = 0,5 \cdot \omega_{CO} + 0,5 \cdot \omega_{H_2} + \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot \omega_{C_xH_y} + 3,8 \cdot \omega_{C_MH_N} - \omega_{O_2} \quad (40)$$

Z toho lze odvodit teoretické množství vzduchu

$$V_{VZ,t}^s = \frac{V_{O_{2,t}} \cdot 100}{21} \quad [\text{m}^3] \quad (41)$$

A skutečné množství vzduchu dle zvoleného přebytku vzduchu.

$$V_{VZ,sk}^s = V_{VZ,t}^s \cdot n \quad [\text{m}^3] \quad (42)$$

Spálením jednoho metru krychlového plynu pak vznikne.

$$V_{Sp,sk} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + V_{O_2} \quad [\text{m}^3] \quad (43)$$

Kde

$$\begin{aligned}
 V_{\text{CO}_2} &= \omega_{\text{CO}} + x \cdot \omega_{\text{C}_x\text{H}_y} + 2,6 \cdot \omega_{\text{C}_m\text{H}_n} + \omega_{\text{CO}_2} \\
 V_{\text{N}_2} &= \omega_{\text{N}_2} + 0,79 \cdot V_{\text{VZ,Sk}}^s \\
 V_{\text{H}_2\text{O}} &= \omega_{\text{H}_2} + \frac{y}{2} \cdot \omega_{\text{C}_x\text{H}_y} + 2,4 \cdot \omega_{\text{C}_m\text{H}_n} \\
 V_{\text{O}_2} &= 0,21 \cdot V_{\text{VZ,t}}^s \cdot (n-1) \quad \text{nebo} \quad V_{\text{O}_2} = V_{\text{O}_2,t} \cdot (n-1)
 \end{aligned}
 \tag{44}$$

3.11.2 Výpočet adiabatické teploty spalin

Adiabatická teplota spalin je pomyslná teplota, kterou by dosáhly spaliny po té, co dojde k dokonalému spálení plynu se vzduchem v izolovaném prostředí, to znamená bez přívodu nebo odvodu tepla. Přičemž vzduchu je právě stechiometrické množství, tedy bez přebytku, a vzduch i plyn před započítáním reakce mají normální teplotu (0 °C).

Adiabatickou teplotu vypočteme z entalpie spalin. Entalpie vyjadřuje tepelnou energii uloženou v jednotkovém množství látky. Můžeme tedy psát.

$$i \cdot V = c_p \cdot t \cdot V \Rightarrow i = c_p \cdot t \tag{45}$$

U skutečných plynů je měrná tepelná kapacita funkcí teploty, zpravidla ji lze vyjádřit pomocí polynomu prvního řádu.

$$c_p = a + b \cdot t \tag{46}$$

Po dosazení (46) do (45)

$$i = a \cdot t + b \cdot t^2 \quad [\text{kJ/m}^3] \tag{47}$$

Entalpie směsi je součtem entalpií jednotlivých látek

$$i_{\text{Sp}} = \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot i_i \quad [\text{kJ/m}^3] \tag{48}$$

A z toho dále vyplývá

$$\begin{aligned}
 i_{\text{Sp}} &= \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot (a_i \cdot t + b_i \cdot t^2) = \sum_{i=1}^{i=n} (\omega_i \cdot a_i \cdot t + \omega_i \cdot b_i \cdot t^2) \\
 i_{\text{Sp}} &= \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot a_i \cdot t + \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot b_i \cdot t^2 = t \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot a_i + t^2 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot b_i
 \end{aligned}$$

$$\text{jestliže} \quad a_{\text{Sp}} = \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot a_i \quad b_{\text{Sp}} = \sum_{i=1}^{i=n} \omega_i \cdot b_i \quad \text{pak}$$

$$i_{\text{Sp}} = t \cdot a_{\text{Sp}} + t^2 \cdot b_{\text{Sp}} \tag{49}$$

Pokud dosadíme koeficienty a_i , b_i pro jednotlivé látky z přílohy č. 1 a objemové podíly jednotlivých látek spalin získáme koeficienty spalin.

Po dosazení do (49) a úpravě.

$$0 = b_{sp} \cdot t^2 + a_{sp} \cdot t - i_{sp} \quad (50)$$

Řešením kvadratické rovnice vypočteme adiabatickou teplotu.

$$t = \frac{-a_{sp} + \sqrt{a_{sp}^2 - 4 \cdot b_{sp} \cdot (-i_{sp})}}{2 \cdot b_{sp}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (51)$$

3.11.3 Výpočet teoretické teploty spalin

Pro stanovení teoretické teploty je nutné do výpočtu zahrnout citelné teplo plynu a spalovacího vzduchu. Budeme vycházet z tepelné bilance.

$$Q_I + 1 \cdot i_{sm} + V_{vz} \cdot i_{vz} = V_{sp} \cdot i_{sp} \quad (52)$$

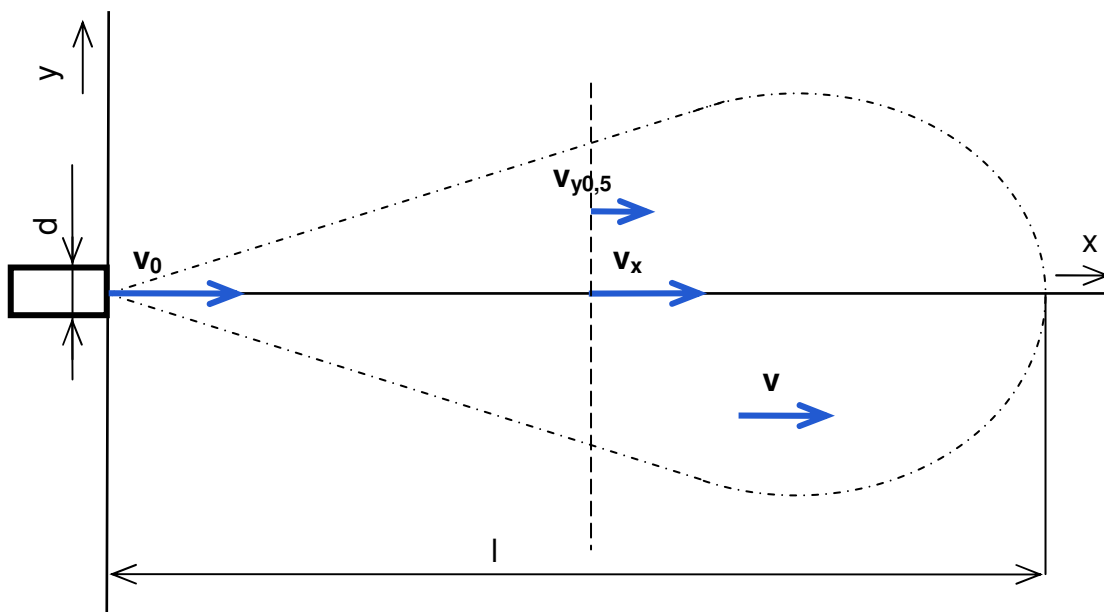
Za i_{sp} dosadíme (49), upravíme a vyřešíme kvadratickou rovnici.

$$\begin{aligned} \frac{Q_I + i_{sm} + V_{vz} \cdot i_{vz}}{V_{sp}} &= a_{sp} \cdot t + b_{sp} \cdot t^2 \\ 0 &= b_{sp} \cdot t^2 + a_{sp} \cdot t - \frac{Q_I + i_{sm} + V_{vz} \cdot i_{vz}}{V_{sp}} \\ t &= \frac{-a_{sp} + \sqrt{a_{sp}^2 - 4 \cdot b_{sp} \cdot \left(-\frac{Q_I + i_{sm} + V_{vz} \cdot i_{vz}}{V_{sp}} \right)}}{2 \cdot b_{sp}} \end{aligned} \quad (53)$$

V případě potřeby lze spočítat skutečnou teplotu spalin. Do výpočtu bychom museli zahrnout odvod tepla do okolního prostředí.

3.12 Výpočet obrysu plamene pro difusní turbulentní hořák

Na základě teorie izotermního výtoku plynu z trysky hořáku do volného prostoru je možno usuzovat na profil plamene při záměnnosti topných plynů. [4]



3.12.1 Rychlostní profil

V ose paprsku ve vzdálenosti x větší než $10d$ lze, pro poměr rychlosti u_x ku střední výtokové rychlosti u_0 , psát rovnici.

$$\frac{v_x}{v_0} = \frac{6 \cdot d}{x} \Rightarrow v_x = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{x} \quad [4, \text{s. 16}] \quad (54)$$

Pro příčný profil ve směru osy y byl odvozen vztah.

$$\frac{v}{v_x} = e^{-0,6931 \left(\frac{y}{y_{0,5}} \right)^2} \quad [4, \text{s. 16}] \quad (55)$$

při čemž pro souřadnice $x:y_{0,5}$ platí

$$\frac{v_x}{2} = v_{y_{0,5}} \quad [4, \text{s. 16}] \quad (56)$$

pro rozšíření paprsku byl odvozen vztah.

$$\frac{y_{0,5}}{d} = 0,08055 \cdot \frac{x}{d} \Rightarrow y_{0,5} = 0,08055 \cdot x \quad (57)$$

Po dosazení (54) a (57) do (55) dostaneme

$$\frac{v}{\frac{6 \cdot d \cdot v_0}{x}} = e^{-0,6931 \left(\frac{y}{0,08055 \cdot x} \right)^2} \Rightarrow u = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{x} \cdot e^{-0,6931 \left(\frac{y}{0,08055 \cdot x} \right)^2} \quad (58)$$

Po úpravě získáme rovnici pro výpočet rychlosti v libovolném místě o souřadnicích x, y .

$$v = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{x} \cdot e^{-106,8 \cdot \left(\frac{y}{x}\right)^2} \quad (59)$$

Nebo tvar vhodný pro určení hladiny s konstantní rychlostí

$$\frac{v \cdot x}{6 \cdot d \cdot v_0} = e^{-106,8 \cdot \left(\frac{y}{x}\right)^2} \Rightarrow \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{v \cdot x} = e^{106,8 \cdot \left(\frac{y}{x}\right)^2} \Rightarrow \ln \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{v \cdot x} = 106,8 \cdot \left(\frac{y}{x}\right)^2$$

$$\sqrt{\ln \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{v \cdot x}} \cdot \sqrt{\frac{1}{106,8}} = \pm \frac{y}{x} \Rightarrow y = \pm 0,09676 \cdot x \cdot \sqrt{\ln \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{v \cdot x}} \quad (60)$$

3.12.2 Obrys plamene

Předpokládáme, že obrys plamene je plocha, kde rychlost proudění je rovna spalovací rychlosti v daném místě. To vyjádříme matematicky. $v = u$ (61)

Vzdálenost obrysu od osy plamene stanovíme jako závislost y-nové souřadnice na střední výtokové rychlosti v_0 , na průměru hořáku, na rychlosti šíření plamene a na vzdálenosti od hořáku x . Do (60) za v dosadíme u .

$$y = \pm 0,09676 \cdot x \cdot \sqrt{\ln \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{u \cdot x}} \quad (62)$$

Na nejvzdálenějším místě obrys protíná osu x to znamená že y je zde rovno nule a velikost x -ové souřadnice nám udává délku plamene. Do (59) dosadíme tedy (61) a $y=0$. délku plamene tedy vypočteme z rovnice.

$$u = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{x} \cdot e^{-106,8 \cdot \left(\frac{0}{x}\right)^2} \Rightarrow 1 = x = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{u} \cdot e^{-106,8 \cdot \left(\frac{0}{x}\right)^2} = \frac{6 \cdot d \cdot v_0}{u} \quad (63)$$

4 Rekapitulace výchozích údajů.

Jak je uvedeno v 2.1, je nutné vytvořit směsný plyn, který bude schopen zastoupit vysokopecní plyn. Tento směsný plyn na bázi dusíku a zemního plynu budeme dále nazývat náhradním vysokopecním plynem. Náhradní vysokopecní plyn musí v případě deficitu vysokopecního plynu udržet v potrubí běžný provozní tlak a při výrobě hutního směsného plynu (VP+KP+ZP) ve směsných stanicích musí nahradit vysokopecní plyn tak, aby vzniklá směs mohla být bez problémově spalována na agregátech, které je potřeba udržet v provozu. Spotřebiče, které je nezbytně nutné udržet v provozu, mají příkon 20 000 kW v hutním směsném plynu. Směs, ve které bude vysokopecní plyn zastoupen náhradním

vysokopecním plynem (NVP+KP+ZP), budeme dále nazývat náhradním hutním plynem. Ohříváče větru na vysokých pecích budou v případě výpadku všech pecí odstaveny a při opětovném zprovoznění je vysoká pec schopna najíždět na nepředehřátý vzduch. Po cca 20 minutách vysoká pec začíná produkovat vysokopecní plyn který může nahřívát ohříváče větru tak, jak tomu je za běžného provozu. Na vysokých pecích tedy náhradní vysokopecní plyn tedy není nutné spalovat.

Náhradní vysokopecní plyn je potřeba dopravit do potrubí vysokopecního plynu, které je v těsné blízkosti projektované směsné stanice. Má mít stejnou výhřevnost jako vysokopecní plyn. Provozní tlak v hlavním řadu vysokopecního plynu kolísá v rozmezí 4 - 6 kPa. Místo napojení směsné stanice na potrubí zemního plnu je vzdálené 150 m a provozní tlak je zde 500 – 600 kPa. Provozní tlak dusíku v místě napojení je 6 kPa. Dusíkové potrubí se nachází v místě projektované směsné stanice. Fyzikální konstanty jednotlivých látek plynů které jsou dále používány ve výpočtech jsou uvedeny v příloze č.1.

4.1 Fyzikální a spalovací vlastnosti hutních plynů

Vlastnosti zemního, koksárenského a vysokopecního plynu jsou vypočteny dosazením údajů z Tabulka č.1 do vztahů odvozených v 3.1. Takto vypočtené vlastnosti jsou uvedeny v Tabulka č.2 a v Tabulka č.3.

| veličina | jednotka | zemní plyn | koksárenský plyn | vysokopecní plyn |
|------------------------------|-----------------------------------|------------|------------------|------------------|
| Hustota | [kg/m ³] | 0,7334 | 0,5046 | 1,3555 |
| Hutnota | [-] | 0,5671 | 0,3902 | 1,0483 |
| Výhřevnost | [MJ/m ³] | 35,8020 | 17,2428 | 3,6980 |
| Spalné teplo | [MJ/m ³] | 39,7060 | 19,4188 | 3,7960 |
| Množství spalin | [m ³ /m ³] | 10,4668 | 4,8913 | 1,5624 |
| Dolní meze výbušnosti | [%] | 5,0119 | 4,9106 | 25,3165 |
| Horní meze výbušnosti | [%] | 15,2300 | 38,0534 | 90,6780 |
| Koncentrace u _{MAX} | [%] | 10,2150 | 22,7557 | 70,4197 |
| Max.rychl.šíř.plamene | [cm/s] | 42,8584 | 121,2748 | 23,4673 |
| Vyšší Wobbeho č. | [kJ/m ³] | 52723,99 | 31087,20 | 3707,58 |
| Korigované Wobbeho č | [kJ/m ³] | 52858,12 | 29282,33 | 2995,59 |
| Spal.potenciál | [-] | 41,3120 | 108,6552 | 22,4428 |
| Dynamická viskozit | [Pa.s.10 ⁻⁶] | 10,9475 | 10,8731 | 16,4625 |

Tabulka č.2 Fyzikální vlastnosti hutních plynů

| | jednotka | zemní plyn | koksárenský plyn | vysokopecní plyn |
|--|-----------------------------------|------------|------------------|------------------|
| Spotřeba vzduchu | [m ³ /m ³] | 9,5228 | 4,2762 | 0,7143 |
| množství spalin na m ³ paliva | | | | |
| množství CO ₂ | [m ³ /m ³] | 1,0105 | 0,4020 | 0,4700 |
| množství N ₂ | [m ³ /m ³] | 7,5319 | 3,4742 | 1,0443 |
| množství H ₂ O | [m ³ /m ³] | 1,9828 | 1,1040 | 0,0500 |
| suma včetně H ₂ O | [m ³ /m ³] | 10,5252 | 4,9802 | 1,5643 |
| suma bez H ₂ O | [m ³ /m ³] | 8,5423 | 3,8762 | 1,5143 |
| entalpie spalin | [kJ/ m ³] | 3401,55 | 3462,28 | 2364,02 |
| koeficient a _i | [-] | 1,3630 | 1,3623 | 1,4258 |
| koeficient b _i | [-] | 0,0002 | 0,0002 | 0,0002 |
| adiabatická teplota | [°C] | 2008,75 | 2039,16 | 1383,41 |

Tabulka č.3 Spalovací vlastnosti hutních plynů

5 Náhradní vysokopecní plyn

5.1 Směšovací poměr náhradního vysokopecního plynu

Objemový podíl zemního plynu a dusíku v náhradním vysokopecní plynu je potřeba stanovit tak, aby výsledná směs měla stejnou výhřevnost jako vysokopecní plyn, to je 3 698 kJ/m³.

Použijeme rovnici (15) s tím, že první složka má nulový hmotnostní podíl.

$$\omega_2 = \frac{1 \cdot Q_{i \text{ Sm}} - \omega_1 \cdot (Q_{i1} - Q_{i3}) - Q_{i3}}{(Q_{i2} - Q_{i3})} \quad (64)$$

$$\omega_{\text{ZP}} = \frac{1 \cdot Q_{i \text{ NVP}} - 0 \cdot (Q_{i1} - Q_{iN}) - Q_{iN}}{(Q_{i \text{ ZP}} - Q_{iN})}$$

po dosazení skutečných hodnot

$$\omega_{\text{ZP}} = \frac{1 \cdot 3,6 - 1 \cdot 0}{35,802 - 0} = \underline{\underline{0,21228 \text{ [m}^3/\text{m}^3]}} \quad (65)$$

Objemový podíl dusíku pak dopočítáme dle()

$$\omega_N = 1 - \omega_{\text{ZP}} = 1 - 0,21228 = \underline{\underline{0,78772 \text{ [m}^3/\text{m}^3]}} \quad (66)$$

5.2 Chemické složení náhradního vysokopecního plynu

K výpočtu chemického složení náhradního vysokopecního plynu jsou použity vztahy z kapitoly 3.5 a z kapitoly 3.7. Složení zemního plynu, dusíku a výsledné hodnoty složení náhradního vysokopecního plynu jsou uvedeny v Tabulka č.4.

| složka | jednotka | ZP | N ₂ | VP | NVP |
|-------------------------------|-----------------------------------|--------|----------------|--------|--------|
| H ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,0000 | 0,0500 | 0,0000 |
| CH ₄ | [m ³ /m ³] | 0,9769 | 0,0000 | 0,0000 | 0,1009 |
| C _n H _m | [m ³ /m ³] | 0,0121 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0012 |
| CO | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,0000 | 0,2500 | 0,0000 |
| CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0021 | 0,0000 | 0,2200 | 0,0002 |
| N ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0089 | 1,0000 | 0,4800 | 0,8976 |
| O ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000 |
| kontrolní součet | [m ³ /m ³] | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |

Tabulka č.4 Složení dusíku, náhradního vysokopecního a zemního plynu

5.3 Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu

K výpočtu fyzikálních a spalovacích vlastností náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu jsou použity vztahy z kapitoly 3 a složení plynů dle kapitoly 2.5 Tabulka č.1 a kapitoly 5.2 Tabulka č.4. Takto vypočtené vlastnosti plynů jsou uvedeny v Tabulka č.5 a v Tabulka č.6.

| veličina | jednotka | ZP | N ₂ | VP | NVP |
|------------------------------|-----------------------------------|----------|----------------|---------|---------|
| Hustota | [kg/m ³] | 0,7334 | 1,2567 | 1,3555 | 1,2026 |
| Hutnota | [-] | 0,5671 | 0,9719 | 1,0483 | 0,9300 |
| Výhřevnost | [MJ/m ³] | 35,8020 | 0,0000 | 3,6980 | 3,6980 |
| Spalné teplo | [MJ/m ³] | 39,7060 | 0,0000 | 3,7960 | 4,1012 |
| Množství spalin | [m ³ /m ³] | 10,4668 | 1,0000 | 1,5624 | 1,9778 |
| Dolní meze výbušnosti | [%] | 5,0119 | - | 25,3165 | 33,8113 |
| Horní meze výbušnosti | [%] | 15,2300 | - | 90,6780 | 63,4956 |
| Koncentrace u _{MAX} | [%] | 10,2150 | - | 70,4197 | 52,4143 |
| Max.rychl.šíř.plamene | [cm/s] | 42,8584 | - | 23,4673 | 4,4269 |
| Vyšší Wobbeho číslo | [kJ/m ³] | 52723,99 | 0,00 | 3707,58 | 4252,69 |
| Korigované Wobbeho č. | [kJ/m ³] | 52858,12 | - | 2995,59 | 4258,96 |
| Spal.potenciál | [-] | 41,3120 | - | 22,4428 | 3,8706 |
| Dynamická viskozita | [Pa.s.10 ⁻⁶] | 10,9475 | 17,5400 | 16,4625 | 16,8591 |

Tabulka č.5 Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu

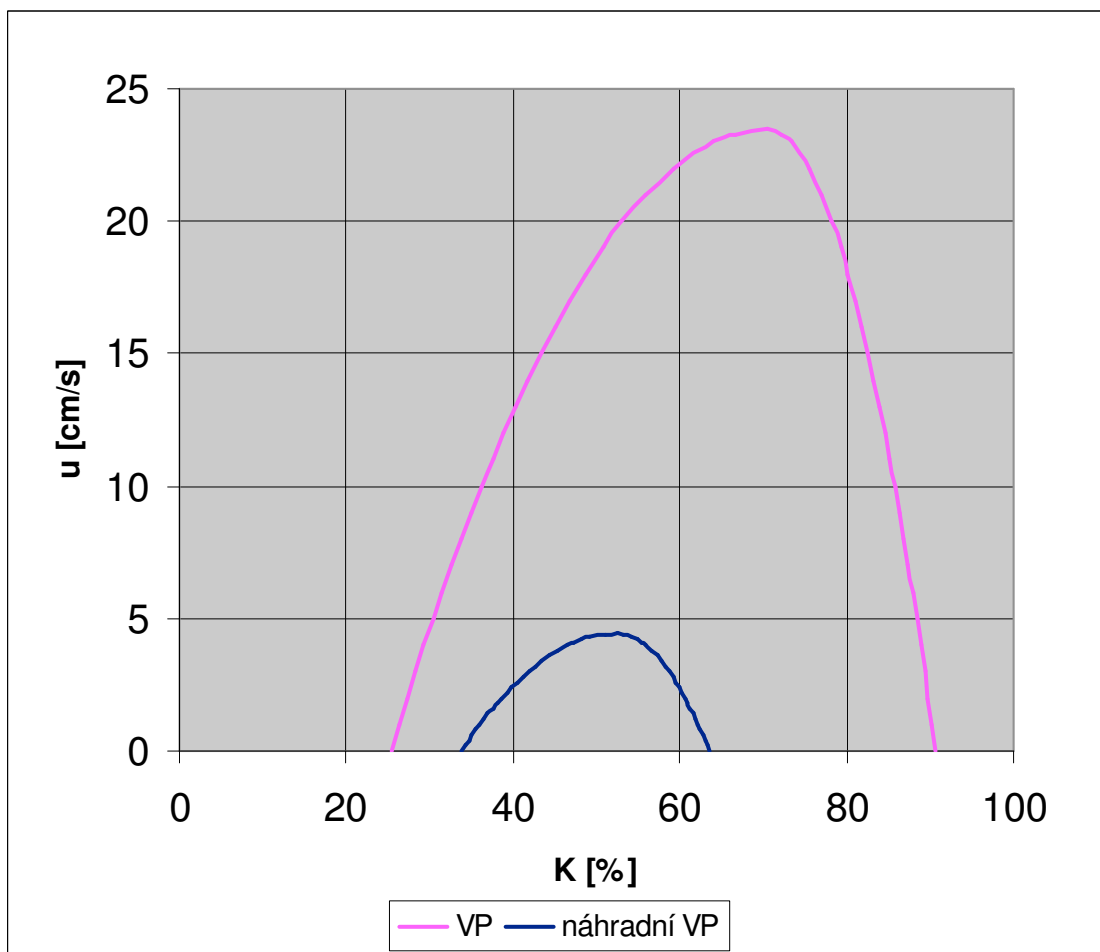
| veličina | jednotka | ZP | N ₂ | VP | NVP |
|--|-----------------------------------|---------|----------------|---------|---------|
| Spotřeba vzduchu | [m ³ /m ³] | 9,5228 | 0,0000 | 0,7143 | 0,9836 |
| množství spalin na m ³ paliva | | | | | |
| množství CO ₂ | [m ³ /m ³] | 1,0105 | 0,0000 | 0,4700 | 0,1044 |
| množství N ₂ | [m ³ /m ³] | 7,5319 | 1,0000 | 1,0443 | 1,6747 |
| množství H ₂ O | [m ³ /m ³] | 1,9828 | 0,0000 | 0,0500 | 0,2048 |
| suma včetně H ₂ O | [m ³ /m ³] | 10,5252 | 1,0000 | 1,5643 | 1,9839 |
| suma bez H ₂ O | [m ³ /m ³] | 8,5423 | 1,0000 | 1,5143 | 1,7791 |
| entalpie spalin | [kJ/ m ³] | 3401,55 | 0,00 | 2364,02 | 1864,04 |
| koeficient a _i | [-] | 1,3630 | 1,2839 | 1,4258 | 1,3272 |
| koeficient b _i | [-] | 0,0002 | 0,0001 | 0,0002 | 0,0001 |
| adiabatická teplota | [°C] | 2008,75 | 0,00 | 1383,41 | 1242,55 |

Tabulka č.6 Vlastnosti náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu

5.4 Záměnnost náhradního vysokopecního a vysokopecního plynu

Z porovnávaných veličin, které jsou shrnuty v Tabulka č.5 a v Tabulka č.6 vyplývá, že oba plyny mají podobné vlastnosti. Rozdíly nalezneme v mezích výbušnosti. Náhradní směsný plyn má mnohem užší pásmo výbušnosti, je tudíž relativně bezpečnější. Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci plynu je stanovena dle kapitoly 3.10 a v Graf č.1 jsou znázorněny tyto závislosti pro vysokopecní plyn a náhradní vysokopecní plyn. Problém v nahrazení vysokopecního plynu vyvolává propastný rozdíl v normálové rychlosti šíření plamene. V případě spalování náhradního vysokopecního plynu na hořácích konstruovaných pro vysokopecní plyn, by docházelo k utržení plamene, právě z důvodu nízké rychlosti šíření plamene a vysoké výtokové rychlosti plynu. Případné snížení výtokové rychlosti na stávajících hořácích je spojeno se snížením výkonu hořáků, což by se dalo kompenzovat zvýšením počtu hořáků. Tyto přídavné hořáky by bylo možné při přechodu zpět na hutní plyn odstavit. Pokud by bylo nutné trvalé spalování náhradního vysokopecního plynu je vhodnější vyměnit stávající hořáky za hořáky nové konstrukce. Dalším možným řešením je vytvoření třísložkového plynu, kde by byla, oproti náhradnímu vysokopecnímu plynu, část zemního plynu nahrazena plynem koksárenským. Koksárenský plyn má vysoké procento vodíku a to znamená, že by se zvyšoval spalovací potenciál takto vzniklého plynu.

Problémy zaměnitelnosti vysokopecního a náhradního vysokopecního plynu na hořácích není nutné řešit, neboť v případě totálního výpadku výroby vysokopecního plynu se odstaví jeho spalování na energetice. Náhradní vysokopecní plyn tedy nebude spalován samostatně, ale pouze ve směsi. Tuto variantu řeší další kapitoly.



Graf č.1 Závislost rychlosti šíření plamene na koncentraci plynu

6 Hutní směsný plyn a náhradní směsný plyn

6.1 Výpočet směšovacího poměru směsných plynů

Poměr jednotlivých plynů musíme stanovit tak, aby vyšší Wobbeho číslo výsledného hutního směsného plynu nebo náhradního směsného plynu dosahovalo určené hodnoty $8,2 \text{ MJ/m}^3$. Jak vyplývá z kapitoly 2.4.

Obecná rovnice (21) pro výpočet směšovacích poměrů má po dosazení konstant náhradního směsného plynu tvar.

$$\omega_{\text{KP}} = \frac{-(B_1 \cdot \omega_{\text{ZP}} + B_2) \pm \sqrt{(B_1 \cdot \omega_{\text{ZP}} + B_2)^2 - 4 \cdot A \cdot (\omega_{\text{ZP}}^2 \cdot C_1 + \omega_{\text{ZP}} \cdot C_2 + C_3)}}{2 \cdot A} \quad (67)$$

Koeficienty této rovnice po dosazení konstant do (20) budou

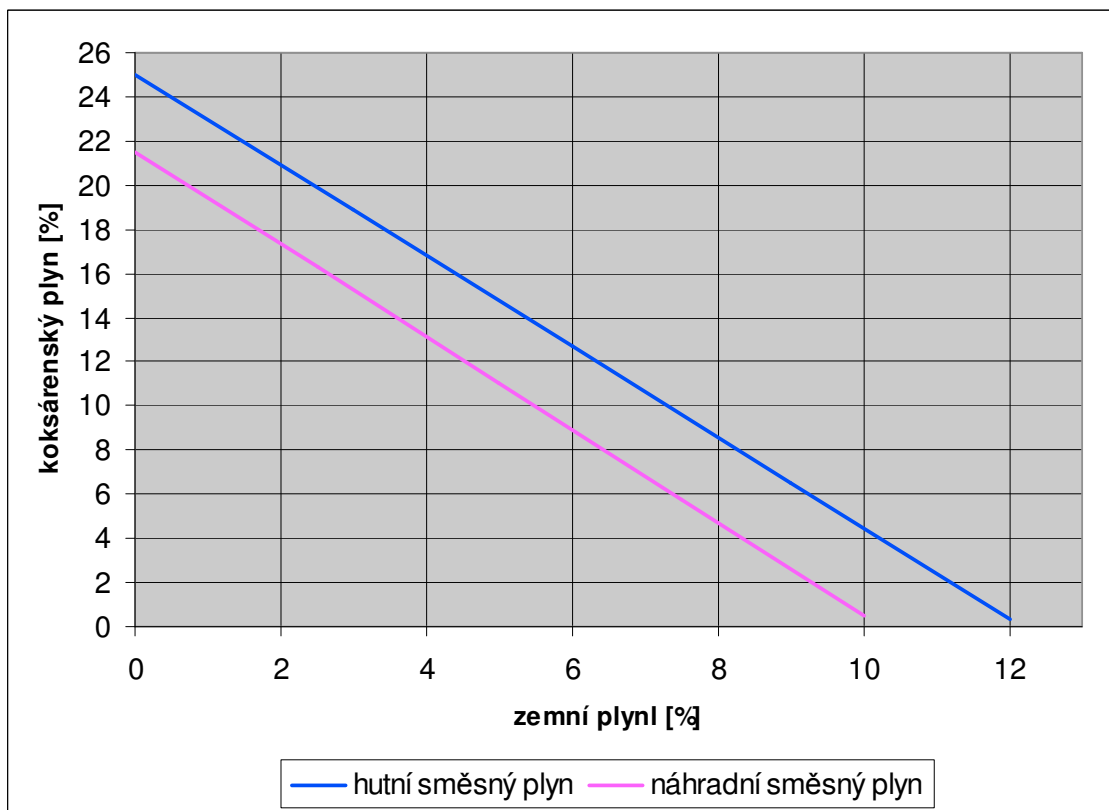
$$\begin{aligned}
A &= Q_{S\text{ KP}}^2 - 2 \cdot Q_{S\text{ KP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} + Q_{S\text{ NVP}}^2 \\
B_1 &= -2 \cdot Q_{S\text{ ZP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} - 2 \cdot Q_{S\text{ KP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} + 2 \cdot Q_{S\text{ ZP}} \cdot Q_{S\text{ KP}} + 2 \cdot Q_{S\text{ NVP}}^2 \\
B_2 &= 2 \cdot Q_{S\text{ KP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} - 2 \cdot Q_{S\text{ NVP}}^2 - \frac{(W_{S\text{ SP}})^2}{\rho_{\text{vzd}(n)}} \cdot \rho_{\text{KP}} + \frac{(W_{S\text{ SP}})^2}{\rho_{\text{vzd}(n)}} \cdot \rho_{\text{NVP}} \\
C_1 &= Q_{S\text{ ZP}}^2 - 2 \cdot Q_{S\text{ ZP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} + Q_{S\text{ NVP}}^2 \\
C_2 &= 2 \cdot Q_{S\text{ ZP}} \cdot Q_{S\text{ NVP}} - 2 \cdot Q_{S\text{ NVP}}^2 - \frac{(W_{S\text{ SP}})^2}{\rho_{\text{vzd}(n)}} \cdot \rho_{\text{ZP}} + \frac{(W_{S\text{ SP}})^2}{\rho_{\text{vzd}(n)}} \cdot \rho_{\text{NVP}} \\
C_3 &= Q_{S\text{ NVP}}^2 - \frac{(W_{S\text{ SP}})^2}{\rho_{\text{vzd}(n)}} \cdot \rho_{\text{NVP}}
\end{aligned} \tag{68}$$

Za konstanty dosadíme konkrétní hodnoty zvolíme podíl zemního plynu a z rovnice (67) vypočteme podíl koksárenského plynu. Podíl vysokopecního plynu dopočteme tak aby součet objemových podílů byl roven 1 to znamená.

$$\omega_{\text{ZP}} + \omega_{\text{KP}} + \omega_{\text{NVP}} = 1 \Rightarrow \omega_{\text{NVP}} = 1 - \omega_{\text{ZP}} - \omega_{\text{KP}} \tag{69}$$

Objemové podíly v hutním směsném plynu vypočteme obdobně s tím že v rovnicích místo náhradního vysokopecního plynu použijeme plyn vysokopecní.

V Graf č.2 je znázorněn podíl koksárenského plynu při měnícím se podílu zemního plynu pro hutní směsný plyn a náhradní směsný plyn s konstantním Wobbeho číslem 8,2 MJ/m³.



Graf č.2 Závislost množství KP na ZP při Wobbeho čísle 8,2 MJ/m³

6.2 Stanovení chemického složení směsných plynů

Směšovací poměr je stanoven dle 6.1 pro Wobeho číslo 8,2 MJ/m³. K výpočtu chemického složení směsného plynu a hutního směsného plynu jsou použity vztahy z 2.5. Výsledné hodnoty složení hutního směsného plynu při 0, 3, 6, 9, a 12 procentech zemního plynu jsou uvedeny v Tabulka č.7. Výsledné hodnoty složení náhradního směsného plynu při 0, 2,5, 5, 7,5 a 10 procentech zemního plynu jsou uvedeny v Tabulka č.8.

| objemový podíl | jednotka | hutní směsný plyn I. | hutní směsný plyn II. | hutní směsný plyn III. | hutní směsný plyn IV. | hutní směsný plyn V. |
|-------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| ZP | [m ³ /m ³] | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 |
| KP | [m ³ /m ³] | 0,2504 | 0,1887 | 0,1269 | 0,0650 | 0,0030 |
| VP | [m ³ /m ³] | 0,7496 | 0,7813 | 0,8131 | 0,8450 | 0,8770 |
| H ₂ | [m ³ /m ³] | 0,1752 | 0,1428 | 0,1104 | 0,0780 | 0,0455 |
| CH ₄ | [m ³ /m ³] | 0,0588 | 0,0736 | 0,0884 | 0,1032 | 0,1179 |
| C _n H _m | [m ³ /m ³] | 0,0088 | 0,0070 | 0,0052 | 0,0034 | 0,0016 |
| CO | [m ³ /m ³] | 0,2014 | 0,2059 | 0,2104 | 0,2149 | 0,2194 |
| CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,1699 | 0,1757 | 0,1815 | 0,1874 | 0,1932 |
| N ₂ | [m ³ /m ³] | 0,3839 | 0,3934 | 0,4030 | 0,4126 | 0,4223 |
| O ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0020 | 0,0015 | 0,0010 | 0,0005 | 0,0000 |
| kontrolní součet | [m ³ /m ³] | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |

Tabulka č.7 Složení hutního směsného plynu

| objemový podíl | jednotka | náhradní směsný plyn I. | náhradní směsný plyn II. | náhradní směsný plyn III. | náhradní směsný plyn IV. | náhradní směsný plyn V. |
|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ZP | [m ³ /m ³] | 0 | 0,025 | 0,05 | 0,075 | 0,1 |
| KP | [m ³ /m ³] | 0,2152 | 0,1628 | 0,1103 | 0,0577 | 0,0051 |
| VP | [m ³ /m ³] | 0,7848 | 0,8122 | 0,8397 | 0,8673 | 0,8949 |
| H ₂ | [m ³ /m ³] | 0,1184 | 0,0895 | 0,0606 | 0,0317 | 0,0028 |
| CH ₄ | [m ³ /m ³] | 0,1298 | 0,1446 | 0,1595 | 0,1743 | 0,1892 |
| C _n H _m | [m ³ /m ³] | 0,0085 | 0,0070 | 0,0055 | 0,0040 | 0,0025 |
| CO | [m ³ /m ³] | 0,0121 | 0,0091 | 0,0062 | 0,0032 | 0,0003 |
| CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0045 | 0,0035 | 0,0025 | 0,0015 | 0,0005 |
| N ₂ | [m ³ /m ³] | 0,7251 | 0,7449 | 0,7648 | 0,7847 | 0,8046 |
| O ₂ | [m ³ /m ³] | 0,0017 | 0,0013 | 0,0009 | 0,0005 | 0,0000 |
| kontrolní součet | [m ³ /m ³] | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 | 1,0000 |

Tabulka č.8 Složení náhradního směsného plynu

6.3 Fyzikální a spalovací vlastnosti směsných plynů

Vlastnosti směsných plynů jsou spočteny dle vztahů v kapitole 3. Takto vypočtené vlastnosti hutních směsných plynů z 6.2 jsou uvedených v Tabulka č.9, a Tabulka č.11. Vlastnosti náhradního směsného plynu jsou uvedeny v Tabulka č.10 a v Tabulka č.12

| veličina | jednotka | hutní směsný plyn I. | hutní směsný plyn II. | hutní směsný plyn III. | hutní směsný plyn IV. | hutní směsný plyn V. |
|---------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| ZP | [m ³ /m ³] | 0 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,12 |
| KP | [m ³ /m ³] | 0,2504 | 0,1887 | 0,1269 | 0,0650 | 0,0030 |
| VP | [m ³ /m ³] | 0,7496 | 0,7813 | 0,8131 | 0,8450 | 0,8770 |
| Hustota | [kg/m ³] | 1,1425 | 1,1763 | 1,2102 | 1,2442 | 1,2783 |
| Hutnota | [-] | 0,8835 | 0,9097 | 0,9359 | 0,9622 | 0,9885 |
| Výhřevnost | [MJ/m ³] | 7,0893 | 7,2166 | 7,3428 | 7,4678 | 7,5918 |
| Spalné teplo | [MJ/m ³] | 7,7076 | 7,8209 | 7,9328 | 8,0435 | 8,1528 |
| Dolní meze výbušnosti | [%] | 12,426 | 13,304 | 14,316 | 15,497 | 16,892 |
| Horní meze výbušnosti | [%] | 67,425 | 64,367 | 61,586 | 59,047 | 56,720 |
| Koncentrace u _{MAX} | [%] | 46,247 | 44,826 | 43,499 | 42,257 | 41,094 |
| Max. rychlost šíř. plamene | [cm/s] | 50,399 | 41,708 | 33,973 | 27,106 | 21,028 |
| Vyšší Wobbeho číslo | [kJ/m ³] | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 |
| Korigované Wobbeho č. | [kJ/m ³] | 7522,5 | 7533,5 | 7544,0 | 7553,9 | 7563,5 |
| Spalovací potenciál | [-] | 42,2047 | 37,5113 | 33,0449 | 28,7931 | 24,7441 |
| Dynamická viskozita | [Pa/s.10 ⁻⁶] | 15,0631 | 15,2425 | 15,4224 | 15,6028 | 15,7837 |

Tabulka č.9 Fyzikální vlastnosti hutního směsného plynu

| veličina | jednotka | náhradní směsný plyn I. | náhradní směsný plyn II. | náhradní směsný plyn III. | náhradní směsný plyn IV. | náhradní směsný plyn V. |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| ZP | [m ³ /m ³] | 0 | 0,025 | 0,05 | 0,075 | 0,1 |
| KP | [m ³ /m ³] | 0,2152 | 0,1628 | 0,1103 | 0,0577 | 0,0051 |
| VP | [m ³ /m ³] | 0,7848 | 0,8122 | 0,8397 | 0,8673 | 0,8949 |
| Hustota | [kg/m ³] | 1,0524 | 1,0773 | 1,1022 | 1,1272 | 1,1521 |
| Hutnota | [-] | 0,8139 | 0,8331 | 0,8524 | 0,8717 | 0,8910 |
| Výhřevnost | [MJ/m ³] | 6,6129 | 6,7052 | 6,7968 | 6,8876 | 6,9778 |
| Spalné teplo | [MJ/m ³] | 7,3976 | 7,4845 | 7,5706 | 7,6558 | 7,7402 |
| Dolní meze výbušnosti | [%] | 14,921 | 16,093 | 17,466 | 19,099 | 21,070 |
| Horní meze výbušnosti | [%] | 55,449 | 53,385 | 51,479 | 49,718 | 48,087 |
| Koncentrace u _{MAX} | [%] | 40,890 | 39,801 | 38,778 | 37,817 | 36,914 |
| Max. rychlost šíř. plamene | [cm/s] | 25,307 | 20,196 | 15,750 | 11,918 | 8,653 |
| Vyšší Wobbeho číslo | [kJ/m ³] | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 | 8200,0 |
| Korigované Wobbeho č. | [kJ/m ³] | 8034,7 | 8073,9 | 8113,5 | 8153,5 | 8210,9 |
| Spalovací potenciál | [-] | 19,5487 | 16,1673 | 12,8843 | 9,69756 | 7,51821 |
| Dynamická viskozita | [Pa/s.10 ⁻⁶] | 15,5709 | 15,737 | 15,9034 | 16,0702 | 16,2372 |

Tabulka č.10 Fyzikální vlastnosti náhradního směsného plynu

| veličina | jednotka | hutní směsný plyn I. | hutní směsný plyn II. | hutní směsný plyn III. | hutní směsný plyn IV. | hutní směsný plyn V. |
|--|-----------------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| vzduchu suchého | [m ³ /m ³] | 1,6061 | 1,65057 | 1,69473 | 1,73859 | 1,78216 |
| množství spalin na m ³ paliva | | | | | | |
| množství CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,4530 | 0,4734 | 0,4938 | 0,5142 | 0,5346 |
| množství N ₂ | [m ³ /m ³] | 1,6526 | 1,6973 | 1,7418 | 1,7861 | 1,8302 |
| množství O ₂ | [m ³ /m ³] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| množství H ₂ O | [m ³ /m ³] | 0,3139 | 0,3068 | 0,2997 | 0,2924 | 0,2851 |
| suma včetně H ₂ O | [m ³ /m ³] | 2,419 | 2,477 | 2,535 | 2,592 | 2,65 |
| suma bez H ₂ O | [m ³ /m ³] | 2,105 | 2,170 | 2,235 | 2,300 | 2,364 |
| entalpie spalin | [kJ/ m ³] | 2930 | 2912 | 2896 | 2880 | 2864 |
| koeficient a _i | [-] | 1,393 | 1,393 | 1,394 | 1,394 | 1,395 |
| koeficient b _i | [-] | 0,00018 | 0,00018 | 0,00018 | 0,00018 | 0,00019 |
| adiabatická teplota | [°C] | 1714,9 | 1705,35 | 1696,17 | 1687,32 | 1678,79 |

Tabulka č.11 Spalovací vlastnosti hutního směsného plynu

| veličina | jednotka | náhradní směsný plyn I. | náhradní směsný plyn II. | náhradní směsný plyn III. | náhradní směsný plyn IV. | náhradní směsný plyn V. |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| vzduchu suchého | [m ³ /m ³] | 1,69218 | 1,733 | 1,77364 | 1,81411 | 1,85439 |
| množství spalin na m ³ paliva | | | | | | |
| množství CO ₂ | [m ³ /m ³] | 0,1684 | 0,1755 | 0,1825 | 0,1895 | 0,1965 |
| množství N ₂ | [m ³ /m ³] | 2,06194 | 2,11401 | 2,16598 | 2,21784 | 2,26962 |
| množství O ₂ | [m ³ /m ³] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| množství H ₂ O | [m ³ /m ³] | 0,39832 | 0,39562 | 0,39286 | 0,39007 | 0,38722 |
| suma včetně H ₂ O | [m ³ /m ³] | 2,62868 | 2,68509 | 2,74134 | 2,79742 | 2,85334 |
| suma bez H ₂ O | [m ³ /m ³] | 2,23036 | 2,28947 | 2,34847 | 2,40735 | 2,46612 |
| entalpie spalin | [kJ/ m ³] | 2515,7 | 2497,2 | 2479,37 | 2462,14 | 2445,48 |
| koeficient a _i | [-] | 1,34155 | 1,34133 | 1,34112 | 1,34092 | 1,34072 |
| koeficient b _i | [-] | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 | 0,00015 |
| adiabatická teplota | [°C] | 1592,52 | 1582,83 | 1573,45 | 1564,36 | 1555,55 |

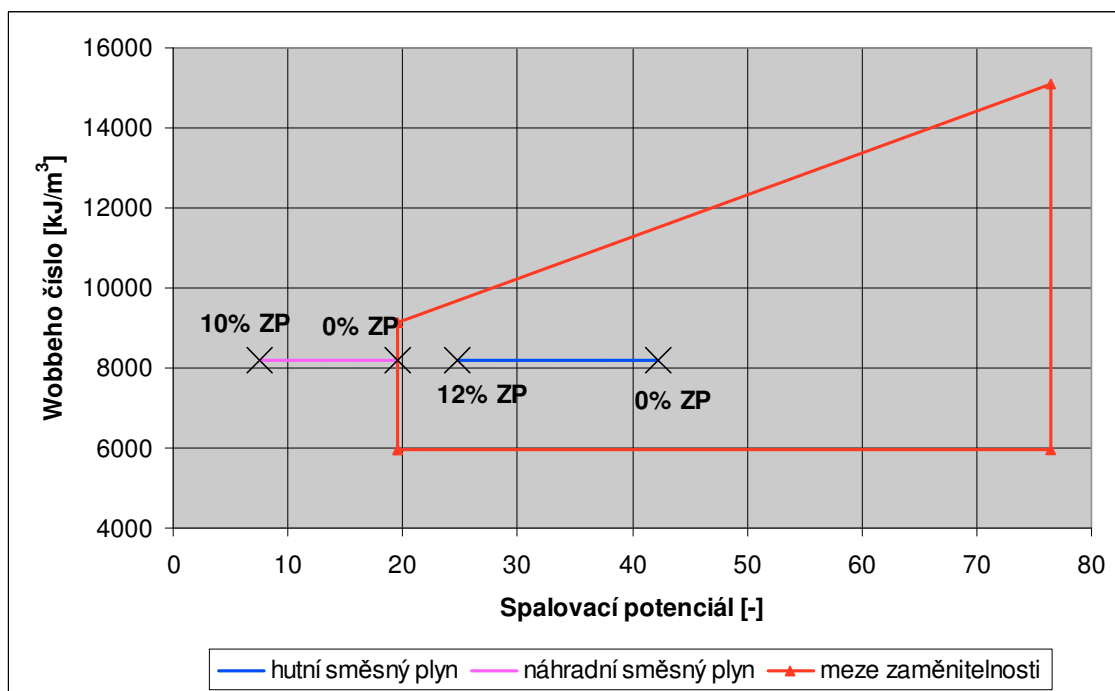
Tabulka č.12 Spalovací vlastnosti náhradního směsného plynu

6.4 Záměnnost směsných plynů

V hutním závodě jsou používány hořáky bez předmíšení. To znamená že, ke styku vzduchu s topným plynem dochází až v ústí hořáku a ve spalovacím prostoru. Rozlišujeme hořáky difúzní, souproudé a vířivé. Difúzní hořák si můžeme představit jako trubici, kterou je do spalovacího prostoru přiváděn topný plyn a vzduch plamen čerpá z okolního prostředí. Souproudý hořák představují souosé trubky, přičemž vnější trubkou je přiváděn pod tlakem vzduch a vnitřní trubkou je přiváděn topný plyn. Vířivý hořák má navíc jednu nebo obě trubky opatřeny lopatkami, které uvádějí plyn do rotačního pohybu a tím dochází k intenzivnějšímu promíchání topného plynu a vzduchu. Ještě intenzivnější promíchání lze docílit, když proud plynu a vzduchu nebude rovnoběžný, ale osy proudů se budou stýkat pod jistým úhlem. Při používání hořáků, které byly původně konstruovány na jiný plyn, hrozí nebezpečí ulétnutí plamene a nebezpečí zpětného šlehnutí. Ke zpětnému šlehnutí dochází v případě, kdy je výtoková rychlost směsi plynu a vzduchu nižší než rychlost hoření. To znamená, že plyn hoří rychleji než je přiváděn, fronta hoření postupuje proti proudu plynů k výtokovému otvoru a může vniknout do hořáku a poškodit ho. Naopak ulétnutím plamene označujeme situaci, kdy rychlost plynu je vyšší než rychlost hoření. Pak se fronta hoření vzdaluje od výtokového otvoru až dojde k přerušení kontaktu mezi hořlavou směsí a frontou plamene, a tedy ke zhasnutí plamene.

Problémy by mohly nastat tam, kde bude náhradní vysokopecní plyn spalován ve směsi jako náhradní hutní plyn. Proto je nutné předběžně odhadnout, zda bude možné náhradní směsný plyn spalovat bez problému na hořácích, které jsou konstruovány původně pro hutní směsný plyn.

Pro posouzení vhodnosti změny ve složení plynu proti původnímu, na který byl plynový spotřebič konstruován, se používají kritériální veličiny, Wobbeho číslo a spalovací potenciál. Pro hodnocení záměnnosti topných plynů je zde použita tzv. Delbourgova metoda. V Graf č.3 jsou vyneseny veličiny jednotlivých plynů a meze použitelnosti získané zkouškami na souproudém hořáku. Z tohoto grafu vyplývá, že náhradní směsný plyn s nulovým množstvím zemního plynu je na hranici použitelnosti pro souproudý hořák. Při zvyšování množství zemního plynu by docházelo k utržení plamene.

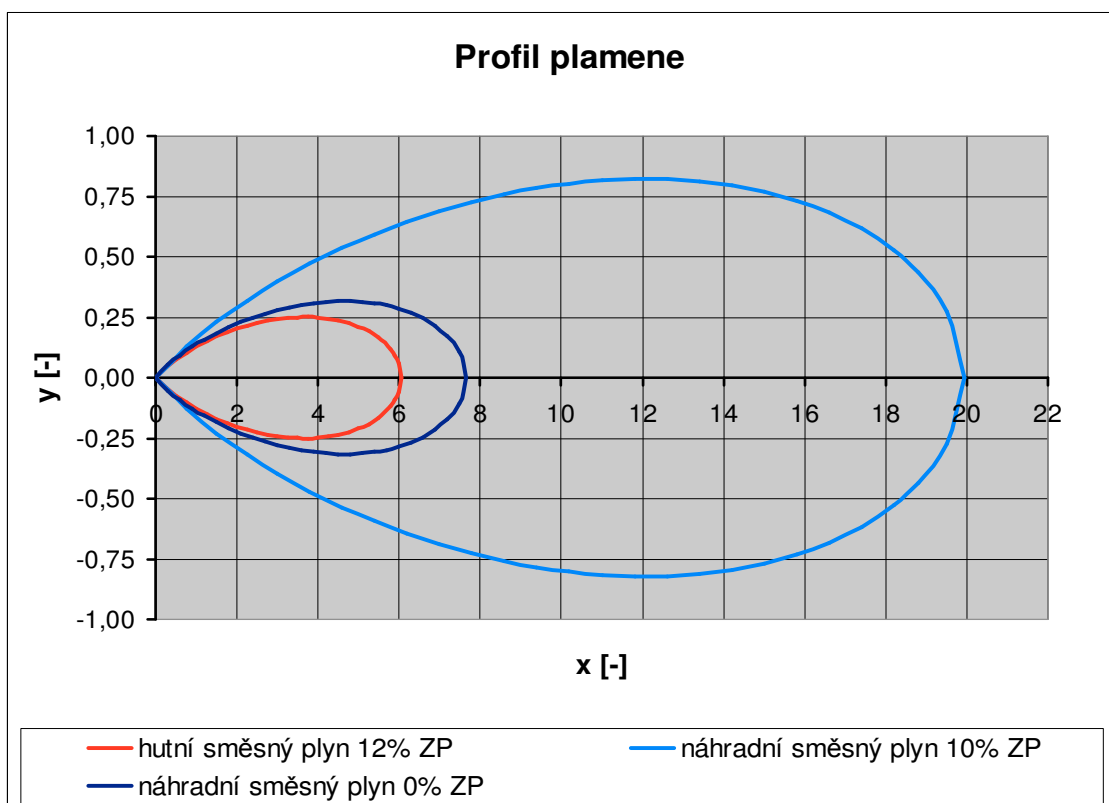


Graf č.3 Diagram zaměnitelnosti plynů

Použitím vztahu (62) a (63) z 3.12.2 vypočteme souřadnice profilu plamene pro hutní směsný plyn s obsahem 0% a 12% zemního plynu a pro náhradní směsný plyn s obsahem 0% a 10% zemního plynu. Hořák, kterým tyto plyny vytékají, má ve všech případech průměr 50 mm a výtoková rychlost plynu je 5 m/s. Výsledné souřadnice jsou uvedeny v Tabulka č.13 . Grafické porovnání jednotlivých profilů je v Graf č.4.

| | | HSP 12% ZP | HSP 0% ZP | NSP 10% ZP | NSP 0% ZP |
|------------|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| výhřevnost | kJ/m ³ | 7593 | 7091 | 6979 | 6614 |
| výkon | | 74,54 | 69,62 | 68,52 | 64,93 |
| C | cm/s | 24,75 | 42,22 | 7,53 | 19,56 |
| l | m | 6,06 | 3,55 | 19,93 | 7,67 |
| | x | y | y | y | y |
| | 0,25 | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,04 |
| | 0,5 | 0,08 | 0,07 | 0,09 | 0,08 |
| | 1 | 0,13 | 0,11 | 0,17 | 0,14 |
| | 1,5 | 0,17 | 0,13 | 0,23 | 0,18 |
| | 2 | 0,20 | 0,15 | 0,29 | 0,22 |
| | 2,5 | 0,23 | 0,14 | 0,35 | 0,25 |
| | 3 | 0,24 | 0,12 | 0,40 | 0,28 |
| | 3,5 | 0,25 | 0,04 | 0,44 | 0,30 |
| | 4 | 0,25 | - | 0,49 | 0,31 |
| | 4,5 | 0,24 | - | 0,53 | 0,32 |
| | 5 | 0,21 | - | 0,57 | 0,31 |
| | 5,5 | 0,16 | - | 0,60 | 0,31 |
| | 6 | 0,06 | - | 0,63 | 0,29 |
| | 6,5 | - | - | 0,66 | 0,25 |
| | 7 | - | - | 0,69 | 0,20 |
| | 7,5 | - | - | 0,71 | 0,11 |
| | 8 | - | - | 0,74 | - |
| | 12 | - | - | 0,82 | - |
| | 16 | - | - | 0,72 | - |
| | 19,9 | - | - | 0,07 | - |

Tabulka č.13 Souřadnice profilu plamene



Graf č.4 Porovnání profilů plamene směsných plynů

Při porovnání profilu plamene difúzního hořáku je náhradní směsný plyn s nulovým obsahem zemního plynu také blíže hutním směsným plynům.

Tím jsme dokázali, že náhradní hutní plyn vytvořený z náhradního vysokopecního a koksárenského plynu, s nulovým množstvím zemního plynu, bude možné spalovat na původních difúzních a původních souproutých hořácích. Jestli že toto tvrzení platí pro souprouté a difúzní hořáky, bude platit i pro vířivé hořáky, které nejsou na ulétnutí plamene tak citlivé. Z toho vyplývá, že po záměně plynů je možné v hutním závodě používat všechny stávající hořáky. Tyto teoretické výpočty lze experimentálně ověřit na zařízení pro zkoušky hořáků. Schéma takového zařízení je v příloze č. 2.

7 Směsná stanice

K výrobě náhradního vysokopecního plynu je určena směsná stanice. Schéma je v příloze č. 3, konstrukční návrh je v příloze č. 4.

7.1 Potřebné množství plynu

Při výpočtu potřebného množství náhradního vysokopecního plynu vycházíme z těchto vztahů:

Přenášený výkon v náhradním směsném plynu (chemická energie za jednotku času)

$$P = \dot{V}_{NSP(n)} \cdot Q_{iNSP(n)}$$

$$\dot{V}_{NSP(n)} = \frac{P}{Q_{iNSP(n)}} \quad (70)$$

$$\dot{V}_{NSP(n)} = \frac{20000}{6613} = 3,024 \text{ m}^3 / \text{s}$$

To je potřebný objemový průtok náhradního směsného plynu za normálních podmínek. V 6.1 vyplynulo, že nejvhodnější poměr pro tvorbu náhradního směsného plnu je 0 : 21,5 : 78,5 (ZP:KP:NVP). To znamená že směs bude obsahovat 78,5 % náhradního vysokopecního plynu. Množství náhradního vysokopecního plynu, které je třeba zajistit pro výrobu výše uvedeného objemu náhradního směsného plynu, tedy vypočteme na základě vztahu (2).

$$\omega_{NVP} = \frac{\dot{V}_{NVP(n)}}{\dot{V}_{NSP(n)}} \Rightarrow \dot{V}_{NVP(n)} = \dot{V}_{NSP(n)} \cdot \omega_{NVP(n)} \quad (71)$$

$$\dot{V}_{NVP(n)} = 3,024 \cdot 0,785 = 2,374 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Směsnou stanici naddimenzujeme s určitou rezervou cca 10%, takže potřebný objemový průtok náhradního vysokopecního plynu za normálních podmínek zvolíme 2,6 m³/s to je 9360 m³/h. Potřebné množství dusíku a zemního plynu pro výrobu náhradního vysokopecního plynu spočteme také podle (2).

$$\dot{V}_{N(n)} = \dot{V}_{NVP(n)} \cdot \omega_N$$

$$\dot{V}_{N(n)} = 2,6 \cdot 0,89671 = 2,3314 \text{ m}^3 / \text{s} = 8393,2 \text{ m}^3 / \text{hod} \quad (72)$$

$$\dot{V}_{ZP(n)} = \dot{V}_{NVP(n)} \cdot \omega_{ZP}$$

$$\dot{V}_{ZP(n)} = 2,6 \cdot 0,10329 = 0,2686 \text{ m}^3 / \text{s} = 966,8 \text{ m}^3 / \text{hod}$$

7.2 Dimenzování potrubí směsné stanice

Přepočet na skutečný tlak a teplotu provedeme pomocí stavové rovnice dle zadaného tlaku jednotlivých plynů.

$$\frac{p_{Sk} \cdot V_{Sk}}{T_{Sk}} = \frac{p_{(n)} \cdot V_{(n)}}{T_{(n)}} \Rightarrow \dot{V}_{Sk} = \frac{T_{Sk} \cdot p_{(n)} \cdot \dot{V}_{(n)}}{T_{(n)} \cdot p_{Sk}} \quad (73)$$

Provozní teplotu zvolíme 20 °C tedy 293,15 °K. Relativní tlak zemního plynu v místě napojení je 600 kPa, za regulační armaturou bude 8 kPa. Relativní tlak dusíku v místě napojení je 6 kPa

Při dimenzování potrubí budeme vycházet z doporučené rychlosti proudění v potrubí 10 až 15 m/s. Z potřebného objemového průtoku a zvolené rychlosti 12 m/s vypočteme teoretickou světlost jednotlivých potrubí.

$$\dot{V}_{sk} = \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \cdot v \quad (74)$$

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk}}{\pi \cdot v}} \quad (75)$$

Jmenovitý průměr a jmenovitý tlak zvolíme podle normy ČSN EN ISO 67 08 [6]. Volíme nejbližší vyšší jmenovitý tlak a nejbližší nižší případně vyšší jmenovitou světlost potrubí.

Vybereme vhodný rozměr trubky a podle skutečné světlosti překontrolujeme skutečnou rychlost plynu v potrubí. Tyto hodnoty pro jednotlivé části směsné stanice jsou uvedeny v Tabulka č.14

7.2.1 Výpočet Reynoldsova čísla

Velikost tlakové ztráty je úměrná součiniteli tření λ a výpočet tohoto součinitele je závislý na druhu proudění, to znamená na Reynoldsově čísle. Než začneme počítat Reynoldsovo číslo, musíme znát dynamickou viskozitu a hustotu uvažovaného plynu. Pro směs plynů je možno stanovit dynamickou viskozitu za normálních podmínek pomocí směšovacího pravidla, dle viskozit a objemových podílů jednotlivých složek.

$$\eta_{(n)} = \sum_{i=1}^{i=n} \omega_{(n)i} \cdot \eta_{(n)i} \quad (76)$$

Tuto viskozitu je nutné podle Sutherlandova vzorce korigovat na skutečnou teplotu, při čemž Sutherlandovu konstantu pro směs na bázi zemního plynu volíme 160

$$\eta = \eta_{(n)} \cdot \sqrt{\frac{T}{273}} \cdot \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \quad (77)$$

Hustotu plynů musíme přepočíst na skutečný tlak a teplotu. K tomu opět použijeme stavovou rovnici.

$$\frac{p_{Sk} \cdot V_{Sk}}{T_{Sk}} = \frac{p_{(n)} \cdot V_{(n)}}{T_{(n)}} \Rightarrow \frac{T_{Sk}}{p_{Sk} \cdot V_{Sk}} = \frac{T_{(n)}}{p_{(n)} \cdot V_{(n)}} \quad (78)$$

Rovnici vynásobíme m , které je pro oba stavy konstantní

$$\frac{T_{Sk} \cdot m}{p_{Sk} \cdot V_{Sk}} = \frac{T_{(n)} \cdot m}{p_{(n)} \cdot V_{(n)}} \Rightarrow \frac{T_{Sk} \cdot p_{Sk}}{p_{Sk}} = \frac{T_{(n)} \cdot p_{(n)}}{p_{(n)}} \quad (79)$$

Po úpravě pak hustota při daném tlaku a teplotě bude

$$\rho_{Sk} = \rho_{(n)} \cdot \frac{p_{Sk} \cdot T_{(n)}}{T_{Sk} \cdot p_{(n)}} \quad (80)$$

Ted' můžeme stanovit Reynoldsovo číslo.

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (81)$$

7.2.2 Výpočet tlakové ztráty

K určení součinitele tření λ použijeme:

- pro oblast rozvinutého turbulentního proudění Gončarovův vzorec. [1, s. 27]

$$\lambda = \frac{1}{\left[2 \cdot \log \left(3,71 \cdot \frac{1}{\varepsilon / d} \right) \right]^2} \quad (82)$$

- pro oblast nerozvinutého turbulentního vzorec podle Altšula [1, s. 26]

$$\lambda = 0,1 \cdot \left(\frac{100}{Re} + \frac{\varepsilon}{d} \right)^{0,25} \quad (83)$$

Za střední nerovnost vnitřního povrchu potrubí budeme dosazovat $\varepsilon = 0,3$. Z monogramu odečteme ekvivalentní délky armatur a tvarových kusů, k nim přičteme délku projektovaného useku a můžeme vypočítat tlakovou ztrátu v dané části potrubí. Tu vypočteme ze vzorce [1, s. 28]

$$\Delta p_z = \lambda \cdot \frac{1 + \sum_{i=1}^{i=n} l_{ekv-i}}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (84)$$

7.3 Shrnutí hodnot

Hodnoty jednotlivých částí potrubí vypočtené podle vztahu uvedených v 7.2 jsou seřazeny v Tabulka č.14

| | | NVP | dusík | ZP za reg. | ZP před reg. |
|-------------------------------|--------------------------|---------|---------|------------|--------------|
| přetlak pl. (začátek úseku) | [Pa] | 5663 | 6000 | 8000 | 600000 |
| objemový průtok normální | [m ³ /s] | 2,600 | 2,3314 | 0,2686 | 0,2686 |
| objemový průtok normální | [m ³ /h] | 9360 | 8393,2 | 966,8 | 966,8 |
| objemový průtok skutečný | [m ³ /s] | 2,6426 | 2,3622 | 0,2671 | 0,0416 |
| objemový průtok skutečný | [m ³ /h] | 9513,2 | 8503,8 | 961,6 | 149,9 |
| světlost potrubí | [m] | 0,530 | 0,501 | 0,168 | 0,066 |
| světlost potrubí | [mm] | 530 | 501 | 168 | 66 |
| jmenovitá světlost | [mm] | 500 | 500 | 150 | 70 |
| průměr trubky | [mm] | 530 | 530 | 159 | 76,1 |
| tloušťka stěny | [mm] | 6 | 6 | 5 | 4 |
| světlost trubky | [mm] | 518 | 518 | 149 | 68,1 |
| skutečná rychlost plynu | [m/s] | 12,539 | 11,209 | 15,319 | 11,432 |
| teplota plynu | [°K] | 293,15 | 293,15 | 293,15 | 293,15 |
| absolutní tlak | [Pa] | 106988 | 107325 | 109325 | 701325 |
| Sutherladova konstanta C | [-] | 160 | 160 | 160 | 160 |
| korekční součinitel viskozity | [-] | 1,0633 | 1,0633 | 1,0633 | 1,0633 |
| dynamická viskozita 0 °C | [Pa/s.10 ⁻⁶] | 16,859 | 17,540 | 10,948 | 10,948 |
| viskozita skutečná | [Pa/s.10 ⁻⁶] | 17,925 | 18,649 | 11,640 | 11,640 |
| Hustota normální | [kg/m ³] | 1,2026 | 1,2567 | 0,7334 | 0,7334 |
| Hustota skutečná | [kg/m ³] | 1,1832 | 1,2403 | 0,7373 | 4,7298 |
| Reynoldsovo číslo | [-] | 428746 | 386144 | 144581 | 316337 |
| střední nerovnost povrchu | [mm] | 0,3 | 0,3 | 0,3 | 0,3 |
| poměrné drsnosti | [-] | 0,00058 | 0,00058 | 0,00201 | 0,00441 |
| součinitel odporu rozvinuté | [-] | 0,01725 | 0,01725 | 0,02345 | 0,02921 |
| součinitel odp. nerozvinuté | [-] | 0,01688 | 0,01701 | 0,02281 | 0,02621 |
| délka potrubí | [m] | 6 | 10 | 3 | 125 |
| ekvivalentní délka | [m] | 3 | 120 | 50 | 100 |
| celková ekvivalentní délka | [m] | 9 | 130 | 53 | 225 |
| tlaková ztráta | [Pa] | 28 | 337 | 721 | 29829 |
| přetlak plynu (konec úseku) | [Pa] | 5635 | 5663 | 7279 | 570171 |

Tabulka č.14 Rozměry a tlaková ztráta směsné stanice

K dosažení požadovaného výkonu 20 000 kW (v NSP) je třeba 2,6 m³/s náhradního vysokopecního plynu. Pro jeho výrobu musíme zajistit 2,2418 m³/s dusíku a 0,2582 m³/s zemního plynu. Dusík bude dopravován potrubím DN 500 PN 6. Na vstupu do směšovače klesne tlak na 5,7 kPa. Zemní plyn bude dopravován potrubím DN 70 PN 6 k regulační armatuře, kde bude při plném výkonu přetlak 570 kPa. Za regulační armaturou je potrubí DN 150 PN 6 a přetlak zemního plynu 8 kPa. Tento tlak klesne na výstupu z difuzoru směšovacího kusu na 7,3 kPa. Směsný plyn bude dopravován potrubím DN 500 PN 6. Jak je uvedeno v kapitole 4, tlak v potrubí vysokopecního plynu se pohybuje v rozmezí 4 - 6 kPa. Relativní tlak náhradního vysokopecního plynu na vstupu do potrubí vysokopecního plynu bude minimálně 5,6 kPa, což je tedy pro udržení přetlaku v potrubí dostačující.

7.4 Výtokový otvor směšovacího kusu

Rychlost zemního plynu ve výtokovém otvoru trysku směšovacího kusu stanovíme z rovnice pro výtok otvorem

$$v = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (85)$$

Pro hustotu zemního plynu, součinitel $\varphi = 0,7$ a Δp dané rozdílem tlaků vstupních tlaků zemního plynu a dusíku do směšovacího kusu je výtoková rychlost.

$$v = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{1616}{0,733}} = 32 \text{ m/s} \quad (86)$$

Velikost výtokového pak vypočteme dle (75)

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{V}_{sk}}{\pi \cdot v}} \quad (87)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,276}{\pi \cdot 32}} = 0,104 \text{ m} = 104 \text{ mm}$$

To znamená, že světlost trubky zemního plynu se ve směšovacím kusu na konci zužuje na 104 mm.

7.5 Rozvod dusíku

Na hlavní řad dusíku je směsná stanice napojena přes hlavní uzávěr dusíku DN 500. Pak je z potrubí vysazena odbočka DN 15 určená k odplynování potrubí. Následuje měřící clona. A za ní je soustava tří elektro - pneumatických klapek. Dvě sériově řazené klapky DN 500 jsou bez napětí v poloze uzavřeno, mezi nimi je

na odbočce do odvzdušnění klapa DN 50, která je bez napětí v poloze otevřeno. Tato soustava slouží k rychlému plynotěsnému oddělení směsné stanice od hlavního řadu dusíku v případě poruch a nečekaných stavů. K tomuto oddělení dochází na povel řídicí jednotky nebo automaticky při výpadku elektrické energie nebo poklesu tlaku ovládacího vzduchu. Pak je potrubí redukováno na DN 400 a zde je regulační elektricky ovládaná klapa DN 400, která udržuje potřebné množství dusíku. Za klapou je potrubí redukováno zpět na DN 500. Zpětná klapa zabraňuje proniknutí zemního plynu do potrubí dusíku. Dále je potrubí zaústěno do směšovacího kusu.

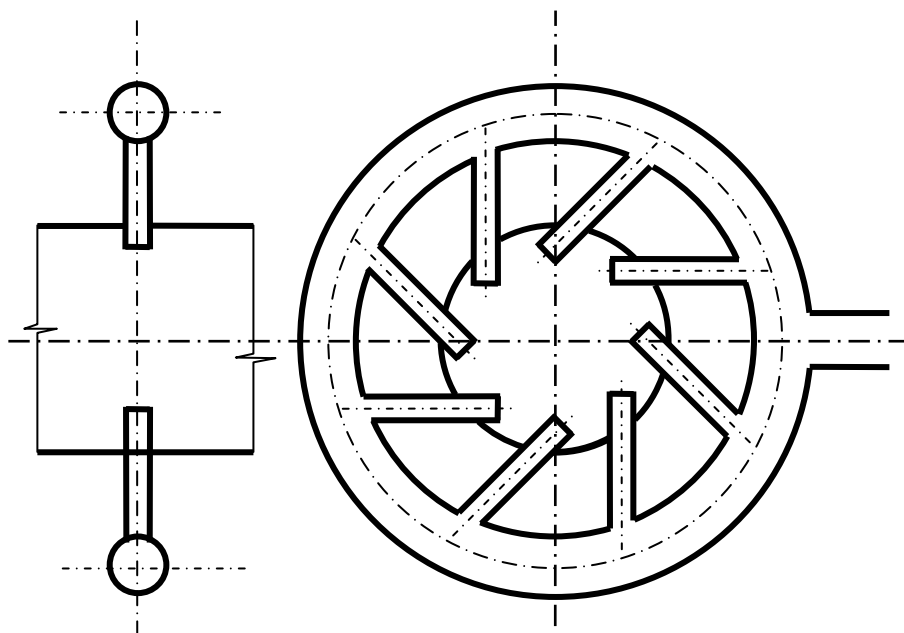
7.6 Rozvod zemního plynu

Na hlavní řad zemního plynu je směsná stanice napojena přes hlavní uzávěr zemního plynu DN 65. Pak je z potrubí vysazena odbočka DN 15 určená k odplyňování potrubí. Následuje filtr a měřící clona. Za ní je soustava tří elektro-pneumatických klapek. Dvě sériově řazené klapky DN 65 jsou bez napětí v poloze uzavřeno mezi nimi je na odbočce do odvzdušnění klapa DN 20 která je bez napětí v poloze otevřeno. Tato soustava slouží k rychlému plynotěsnému oddělení směsné stanice od hlavního řadu dusíku v případě poruch a nečekaných stavů. K tomuto oddělení dochází na povel řídicí jednotky nebo automaticky při výpadku elektrické energie nebo poklesu tlaku ovládacího vzduchu. Dále je na potrubí regulační elektricky ovládaný ventil DN 65, který udržuje potřebný tlak zemního plynu. Za ventilem je potrubí redukováno na DN 150. Zpětná klapa zabraňuje proniknutí dusíku do potrubí zemního plynu. Pak je potrubí zaústěno do směšovacího kusu.

7.7 Směšovací kus

Pro lepší promíchání plynu se směšovací kusy vyrábějí s tangenciálním vstupem přídavného plynu do trubky nosného plynu jak je patrné z obrázku č.2. V našem případě to není nutné protože směsná stanice se nachází minimálně 700 m od místa, kde bude plyn dále upravován. Můžeme předpokládat, že po této trase dojde k dostatečnému promíchání všech složek náhradního vysokopecního plynu. Proto je navržen levnější a výrobně jednodušší směšovač. Směšovací kus je svařenec. Těleso směšovacího kusu je vytvořeno skružením plechu. Pro zvýšení pevnosti je zaústění potrubí zemního plynu do směšovacího kusu provedeno

límce 200x200 mm. Trubka z přívodem zemního plynu průměr 159x5 se zužuje na světlost výstupního otvoru průměr 104 mm.



Obrázek č.2 Vířivý směšovač

7.8 Potrubí směsného plynu

Ze směšovacího kusu vede potrubí DN 500. Před hlavním uzávěrem je vysazena odbočka DN 250 osazena šoupátkem DN 250 vzorkovacím kohoutem. Tato odbočka slouží k odplynění, k zaplynění a k provozním zkouškám směsné stanice. Za hlavním uzávěrem je potrubí zaústěno do hlavního řádu vysokopecního plynu DN 2300.

8 Závěr

Navržená směsná stanice vyhovuje výkonově i tlakově požadovaným potřebám. Bude schopna udržet přetlak plynu v hlavním řádu vysokopecního plynu a tím zabráni vniknutí vzduchu do potrubí a vytvoření výbušné atmosféry v tomto potrubí. Směsná stanice náhradního vysokopecního plynu bude schopna vyprodukovat dostatečné množství plynu k nouzovému spalování. Z 5.4 vyplývá, že samostatné spalování tohoto plynu by mohlo být problematické z technického hlediska. Ale samostatné spalování náhradního vysokopecního plynu by bylo nevhodné i z ekonomického hlediska. Pokud však původním potrubím vysokopecního plynu přivedeme náhradní vysokopecní plyn na stávající směsné stanice, můžeme tam vyrábět náhradní hutní plyn, který plnohodnotně zastoupí hutní směsný plyn. Na stávajících směsných stanicích nejsou nutné žádné úpravy. Na dispečerském pracovišti se nastaví automatický provoz těchto směsných stanic s tím, že se zadá nulový podíl zemního plynu. Směsná stanice pak bude míchat koksárenský a náhradní vysokopecní plyn v zadaném poměru (21,5 : 78,5). Takto vyrobený náhradní směsný plyn může být bez problému spalován na pecích pro ohřev válcovaného materiálu. Kromě výstavby náhradní směsné stanice a jejího napojení na potrubí dusíku, zemního a vysokopecního plynu, nejsou tedy nutné žádné další investice a zásahy do stávající technologie. Samotné napojení se provede vysazením odboček a navrtáním potrubí pod tlakem, tak že ani výstavba směsné stanice neomezí provoz hutních agregátů.

Seznam použité literatury

- [1] KYSELA, L. *Plynárenské rozvody a spotřebiče: Poznámky k přednáškám*. Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava.
- [2] Kolektiv autorů. *Plynárenská příručka*. Praha: s.r.o. Gas, 1997. ISBN 60-902339-6-1
- [3] KYSELA, L. *Studie podmínek pro přechod plynových spotřebičů ve s.p. Vítkovice na náhradní plyn*. Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava.
- [4] KYSELA, L. *Studie zaměnitelnosti topných plynů a model plynové bilance Nové Huti, a.s. Ostrava*. Katedra energetiky VŠB – TU Ostrava, červen 1994.
- [5] ČSN 38 5543. *Stanovení záměnnosti topných plynů. Delbourgova metoda*. Praha : Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1973. Zrušená norma (bez náhrady). Platnost ukončena v prosinci 1998
- [6] ČSN EN ISO 6708. *Potrubní části. Definice a výběr jmenovitých světlostí. DN*. Praha: Český normalizační institut, prosinec 1996.

Seznam příloh

Příloha č. 1 Tabulka fyzikálních a spalovacích konstant

Příloha č. 2 Schéma zařízení pro zkoušení hořáků 002

Příloha č. 3 Schéma směsné stanice náhradního vysokopevního plynu 001

Příloha č. 4 Směsná stanice náhradního vysokopevního plynu 001.1